

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2019



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2019

Mémoire de Master

Filière : Travaux Public

Spécialité : Vois et Ouvrages d'arts

Thème

**Application pratique de la norme NF EN 206-1 sur
les ouvrages d'arts**

Nom et Prénom de l'étudiant :

❖ KHERIF Yassine

Encadreur :

Pr. GUETTALA Abdelhamid

Promotion Juillet 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le Dieu, ma créateur qui ma donné la santé et les forces
et la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce mémoire.

J'adresse le grand remerciement à mon encadreur **Pr. Abdelhamid GUETTALA** qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience et sa vigueur.

Je dédie ce modeste travail à :

A mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père « **AMAR** ».

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman « **MEBARKA** » que je l'adore.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à mes frères **RACHID, ALLAWA, ABDELHADI, YOUNESSE, HOUILLI** et **DJASSEM** et mes sœurs **HAYAT, NADIA, IZHAR, MAJDA, KHANSAA** et **KHADIDJA**, qui m'adresse au ciel les vœux, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

A mon cousin **JOUSEF KARBO**, mon bras droit

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours dans mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude, et frères de cœur : **YOUSSEF, MOSTAFA, HICHAM, MOHAMED** et **SOHEIB**.

A tous mes très chers amis que je considère comme une deuxième famille.

Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction général

Chapitre I : Pathologie et durabilité du béton

I.1. Introduction.....	2
I.2. Béton.....	2
I.2.1. Un peu d'histoire.....	2
I.2.2. Composants.....	3
I.2.2.1. Ciment.....	3
I.2.2.1.1. Constituants.....	4
I.2.2.1.2. Différents types de ciments.....	4
I.2.2.1.3. Exigences mécaniques, physiques, chimiques et de durabilité.....	6
I.2.2.1.4. Critères de conformité.....	8
I.2.2.1.5. Critères de conformité pour les propriétés mécaniques, physiques, chimiques et méthode d'évaluation.....	8
I.2.2.2. Eau de gâchage.....	9
I.2.2.3. Granulats.....	9
I.2.2.4. Adjuvant.....	9
I.2.2.5. Les additions.....	9
I.2.2.6. Les ajouts.....	10
I.2.3. Formulation.....	10
I.2.4. Propriétés mécaniques des bétons.....	10
I.3. La Pathologie du béton.....	11
I.3.1. Les causes physiques de dégradations des bétons.....	11
I.3.2. Les cycles gel/dégel.....	13
I.3.2.1. Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel et aux sels de déverglaçage.....	13
I.3.2.2. Les mécanismes développés par le gel.....	14

I.3.2.3. Action des cycles gel/dégel.....	15
I.3.2.4. Action des sels de déverglaçag.....	15
I.3.2.5. Béton avec adjuvant entraîneur d'air.....	16
I.3.2.6. Classes d'expositions.....	16
I.3.2.7. Carte de gel et salage.....	17
I.3.2.8. Différents types de béton.....	19
I.3.3. Carbonatation du béton.....	19
I.3.3.1. Généralité.....	19
I.3.3.2. Action du gaz carbonique (carbonatation).....	20
I.3.3.2.1. Mécanisme de la carbonatation.....	20
I.3.3.3. Corrosion des armatures liées à la carbonatation.....	21
I.3.3.3.1 Corrosion des armatures.....	21
I.3.3.3.2. Les étapes de la corrosion des armatures.....	22
I.3.3.4. Profondeur de la carbonatation.....	23
I.3.3.5. Mesures prévention préconisées par les normes.....	24
I.3.3.6 Dosage minimum en ciment et rapport eau-ciment maximum.....	24
I.3.3.7. Paramètres influencent la carbonatation.....	25
I.3.3.7.1 Paramètre de formulation.....	25
I.3.3.7.2. Résistance mécanique à la compression.....	25
I.3.4. Pénétration des ions chlorures.....	27
I.3.5. Réaction sulfatique interne RSI (formation différée d'ettringite).....	28
I.3.5.1. Généralité.....	28
I.3.6. Les réactions l'alcali.....	32
I.3.6.1. Facteurs d'influence pour les réactions alcali-granulats.....	33
I.3.7. Les autres causes de dégradation de béton.....	34
I.4. La durabilité et durée de vie d'un ouvrage.....	35
I.4.1. La durabilité des structure en BA.....	35
I.4.2. Définition de la durée de la vie d'un ouvrage.....	36
I.4.3. La durabilité des bétons dans la norme NF EN 206-1.....	36
I.4.3.1 Les classes d'expositions.....	36
I.4.4. Les indicateurs de durabilité.....	37
I.4.4.1. Indicateurs de durabilité générale.....	37

I.4.4.2. Indicateurs de durabilité spécifiques à l’alcali-réaction.....	37
I.4.4.3. Indicateurs de durabilité spécifiques à l’attaque sulfatique.....	37
I.4.5. Spécifications relatives aux indicateurs de durabilité.....	38
I.4.5.1. Types d’environnement.....	38
I.4.5.2. Spécifications types pour la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures.....	38
I.4.5.3. Spécifications types pour la durabilité vis-à-vis de l’alcali Réaction.....	39
I.5. Conclusion.....	39

Chapitre II : La Norme NF EN 206-1

II.1. Introduction.....	41
II.2. Contexte de la norme NF EN 206-1.....	41
II.3. Présentation généralité de la norme NF EN 206-1.....	42
II.3.1. Généralités	42
II.3.1.1. Domaine d’application.....	44
II.3.2. Évolutions de la norme.....	45
II.3.2.1. Clarification des responsabilités des différents intervenants.....	45
II.3.2.2. Désignation des béton.....	46
II.3.2.2.1. Les Bétons à Propriétés Spécifiées (BBS).....	46
II.3.2.2.2. Les Bétons à Composition Prescrite (BCP).....	48
II.3.3.2.3. Les Bétons à Composition Prescrite dans une Norme (BCPN).....	48
II.3.3.3. Classes d’expositions des bétons.....	48
II.3.3.4. Spécification du béton.....	49
II.3.3.4.1. Spécification des Bétons à Propriétés Spécifiées	49
II.3.3.4.2. Spécification des Bétons à Composition Prescrite.....	49
II.3.3.5. Exigences relatives au béton et méthodes de vérification	50
II.3.3.5.1. Exigences de base relatives aux constituants	51
II.3.3.5.2. Exigences de base pour la composition du béton	51

II.3.3.6. Exigences spécifiées par la norme NF EN 206/C.....	51
II.3.3.7. Exigences liées aux classes d'expositions	51
II.4. Taches et responsabilité des acteurs	52
II.5. Classification des bétons.....	53
II.5.1. Classe de consistance du béton frais	53
II.5.2. Classe de résistance à la compression des bétons durcis.....	53
II.5.3. Classe de masse volumique	55
II.5.4. Classes de teneur en chlorures	55
II.5.5. Dimension maximal des granulats	56
II.5.6. Classes d'expositions.....	57
II.5.6.1. Classes d'exposition courante	59
II.5.6.2. Classes d'exposition particulier.....	62
II.5.6.3. Valeurs limites pour le classement des attaques chimiques	63
II.5.6.4. Désignation d'un BPS conforme à la norme NF EN 206-1	65
II.5.6.5. Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons.....	65
II.6. Exemple de classe d'exposition	66
II.7. Durabilité – Enrobage.....	70
II.7.1. Enrobage nominal (c_{nom})	70
II. 7.2. Enrobage minimal (c_{min}).....	70
II.7.3. Enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence ($c_{min,b}$).....	71
II.7.4. Enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement ($c_{min,dur}$)	71
II.8. Aide au choix des classes d'expositions pour les ouvrages d'art	72
II.8.1. Mode d'emploi des tableaux	72
II.8.2. Salage	72
II.9. Contrôle de conformité	78
II.10 : Contrôle de production	78
II.11. Exemple de désignation des bétons.....	79
II.11.1. Béton à Propriétés Spécifiées (BPS).....	79
II.11.2. Béton à Composition Prescrite (BCP)	80

II.13. Conclusion	80
-------------------------	----

Chapitre III : Cas d'étude des classes d'exposition

III.1. Introduction.....	82
III.2. Contexte de la formulation d'un béton ordinaire.....	82
III.2.1 Les règles de formulation	83
III.3. Les méthodes de formulation du béton.....	90
III.3.1. Choix d'une méthode de formulation.....	91
III.3.2. Définition du cahier des charges.....	91
III.4. Méthodes de calcul de la composition du béton selon Dreux Gorisse.....	91
III.4.1. Données de base.....	91
III.4.2. Dimension maximale des granulats « D ».....	92
III.4.3. Dosage en ciment.....	92
III.4.4. Dosage en eau.....	93
III.4.4.1. Correction du dosage en eau en fonction de D_{max}	94
III.4.4.2. Dosage en eau réelle.....	95
III.4.5. Dosage des granulats.....	95
III.4.5.1. Tracé de la courbe granulométrique de référence.....	95
III.4.6. Volume total des granulats.....	96
III.4.7. Proportions des divers granulats.....	96
III.5. Formulation du béton ordinaire.....	97
III.5.1. Résistance visée.....	97
III.5.2. Dosage en ciment et eau.....	97
III.5.3. Détermination des pourcentages des granulats.....	98
III.5.3.1. Granulat (7/15,15/25).....	98
III.5.3.2. Sable.....	100
III.5.3.3. La ligne de partage.....	101
III.5.4. Coefficient de compacité.....	102

III.5.5. Résistance visée.....	104
III.5.6. Dosage en ciment et eau.....	104
III.5.7. Détermination des pourcentages des granulats.....	106
III.5.7.1 Granulat (7/15,15/25).....	106
III.5.7.2. Sable.....	106
III.5.8. Détermination des pourcentages des granulats.....	106
III.5.8.1.Tracé de la courbe granulaire de référence.....	106
III.5.9. Coefficient de compacité.....	106
III.6. Conclusion.....	107

Conclusion générale

Références bibliographie

Annexe

Liste des Figures

Figure I.1: Pont de Normandie avec 856 mètres de travée centrale.....	3
Figure I.2: Dégradations de béton armé.....	11
Figure I.3: Intrados des ponts dégradés.....	12
Figure I.4: Barrières de retenue dégradées.....	12
Figure I.5: Fissuration interne.....	14
Figure I.6: Écaillage de la surface.....	14
Figure I.7: Corrosion des armatures consécutive à la fragilisation du béton d'enrobage et à l'utilisation des sels de déverglaçage.....	15
Figure I.8: L'entraînement d'air dans les bétons.....	16
Figure I.9: Carte des zones de gel en France.....	17
Figure I.10: Carte des zones de salage en France.....	18
Figure I.11: Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	21
Figure I.12: Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers.....	22
Figure I.13: Représentation schématique des étapes de corrosion des armatures du béton causé par CO_2	23
Figure I.14: Profondeur carbonatée en fonction de la racine du temps.....	26
Figure I.15: Influence de la résistance en compression à 28 jours sur la profondeur carbonatée avec différents ciments et différentes expositions.....	26
Figure I.16: Mécanisme de corrosion par des piqûres due aux chlorures.....	27
Figure I.17: Expansion des mortiers ayant différents rapports E/C (ciment Type III).....	29
Figure I.18: Expansion dans le temps de bétons ayant différents volumes d'air occlus ou entraîné (rapport E/C 0,55; 300 kg de ciment par m^3 ; ciment Type III).....	29
Figure I.19: Cube de 0,6m de côté dans de l'eau saturée en chaux.....	30
Figure I.20: Température des bétons « autochauffés » les 9 premiers jours.....	31
Figure I.21: Expansion des bétons durant autochauffés dans le temps.....	31
Figure I.22: Micrographie de l'ettringite massive, mal cristallisée dans l'interface entre le granulat et la pâte; cube TIII-c après 400 jours.....	32
Figure I.23: Fissuration en étoile de plusieurs millimètres d'ouverture due à la réaction alcali-granulat.....	32

Figure II.1: Evaluation de la norme NF EN 206-1.....	41
Figure II.2: Relations entre les divers intervenants.....	46
Figure II.3: Les BPS sont les bétons principalement fabriqués et commercialisé par les centrales de BPE.....	47
Figure II.4: Les différents granulats.....	56
Figure II.5: Carte des zones de gel.....	61
Figure II.6: Carte des zones de rigueur hivernale SERTA.....	62
Figure II.7: Combinaison de classe d'exposition - Exemple : XA ₁ / XF ₂ / XC ₃	67
Figure III.1: Combinaison des classes d'exposition de la norme NF EN 206-1.....	84
Figure III.2: Classes d'exposition dans le bâtiment 1 avec certaines caractéristiques d'applications courantes.....	84
Figure III.3: Combinaison des classes d'exposition de la norme NF EN 206-1.....	86
Figure III.4: Classes d'exposition dans le bâtiment 2 avec certaines caractéristiques d'applications courantes.....	87
Figure III.5: Combinaison des classes d'exposition de la norme NF EN 206-1.....	88
Figure III.6: Classes d'exposition dans le bâtiment 3 avec certaines caractéristiques d'applications courantes.....	89
Figure III.7: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).....	93
Figure III.8: Variation relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de chocs du test d'ouvrabilité C.E.S. en fonction de l'affaissement.....	94
Figure III.9: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).....	98
Figure III.10: Courbe granulométrique du granulat.....	99
Figure III.11: Courbe granulométrique du sable.....	100
Figure III.12: courbe granulométrique de référence (Dreux-Gorisse).....	102
Figure III.13: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).....	105

Liste des tableaux

Tab I.1: Les 27 produits de la famille des ciments courants.....	6
Tab I.2: Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques.....	7
Tab I.3: Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques.....	8
Tab. I.4: Différents type de béton.....	19
Tab I.5: Classes d'exposition associées à la corrosion par carbonatation.....	31
Tab I.6: Exigences de durabilité vis-à-vis de la carbonatation associées aux classes d'exposition.....	32
Tab I.7: Les causes d'endommagement du béton et leurs symptômes.....	35
Tab II.1: Classes de consistance des bétons.....	53
Tab II.2: Classe de résistance à la compression pour les bétons masse volumique normale les bétons lourds.....	54
Tab II.3: Classe de résistance pour les bétons légers.....	55
Tab II.4: Type de béton en fonction de sa masse volumique.....	55
Tab II.5: Les classes des chlorures.....	55
Tab II.6: Les classes de chlorures à respecter en fonction e l'utilisation du béton.....	56
Tab II.7: Les classes d'exposition.....	59
Tab II.8: Valeurs limites spécifiées pour les classes d'expositions courantes.....	61
Tab II.9: Classes d'exposition à retenir en fonction du lieu de l'ouvrage.....	62
Tab II.10: Valeurs limites pour les attaques chimiques des eaux de surfaces et Souterraines.....	64
Tab II.11: Valeurs limites par les attaques chimiques des sols nature.....	64
Tab II.12: Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition particulières.....	65
Tab II.13 : Valeurs limites spécifiées applicables en France à la composition et aux propriétés du béton.....	66
Tab II.14 : Exemple de classe d'exposition pour le bâtiment (intérieur des terres – gel faible ou modéré).....	68
Tab II.15: Exemple de classe d'exposition pour le bâtiment (intérieur des terres –gel sévère).....	68
Tab II.16: Exemple de classe d'exposition pour le bâtiment (bord de mer – entre 100 m (parfois 500 m) et 1km (parfois 5 m) de la côte).....	69

Tab II.17: Exemple de classe d'exposition pour le bâtiment (front de mer – moins de 100 m (parfois 500 m) de la côte).....	69
Tab II.18: Des correspondances pour les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 et XF4.....	71
Tab II.19: Des valeurs Tableau des valeurs $c_{\min, \text{dur}}$ (en mm) en fonction de la classe d'exposition.....	72
Tab II.20 : Ouvrages d'art situés en mer, ou à moins de 100 m de la côte (ou jusqu'à 500m de la côte, suivant la topographie particulière, lorsque les parties aériennes sont soumises à un risque d'expositions aux embruns).....	74
Tab II.21 : Ouvrages d'art situés à moins de 1 km de la côte (ou jusqu'à 5 km de la côte, suivant la topographie particulière) lorsque les parties aériennes de ces ouvrages sont exposées à un air véhiculant du sel marin, mais pas directement aux embruns.....	75
Tab II.22 : Ouvrages d'art à l'intérieur des terres en zone de gel faible ou modéré.....	77
Tab II.23 : Ouvrages d'art à l'intérieur des terres en zone de gel sévère.....	78
Tab III.1 : Valeurs limites spécifiques applicables d'un ouvrage à la composition et aux propriétés du béton.....	86
Tab III.2 : Valeurs limites spécifiques applicables d'un ouvrage à la composition et aux propriétés du béton.....	88
Tab III.3 : Valeurs limites spécifiques applicables d'un ouvrage à la composition et aux propriétés du béton.....	90
Tab III.4 : Consistance du béton.....	92
Tab III.5 : Evaluation de « D ».....	92
Tab III.6 : valeur approximatives du coefficient granulaire « G ».....	93
Tab III.7: Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale des granulats.....	94
Tab III.8 : Valeurs du terme correcteur K.....	95
Tab III.9 : Valeurs du coefficient de compacité γ_c	96
Tab III.10 : Analyse granulométrique de granulat.....	99
Tab III.11 : Analyse granulométrique du sable.....	100
Tab III.12 : Le volume des composants.....	103
Tab III.13 : Les composants en masse.....	103
Tab III.14 : Composition d'un mètre cube du béton.....	104
Tab III.15 : Le volume des composants.....	107

Tab III.16 : Les composants en masse.....107

Tab III.17 : Composition d'un mètre cube du béton.....107

Résumé

La durabilité du béton dépend des conditions qui sont conçues pour lui et qui fonctionnent longtemps dans son environnement, sans dommage, afin de maintenir et de pérenniser les installations physiques. En d'autres termes, la durabilité est la résistance du béton à la détérioration, qu'elle soit provoquée par des facteurs externes ou internes.

Cette mémoire vise à est d'appliquer la norme NF EN 206-1 aux installations techniques. La présente norme concerne le béton prêt à l'emploi et le béton fabriqué sur le chantier de construction ainsi que le béton produit dans une usine préfabriquée. Cette norme est un outil important dans la description, la formulation, la fabrication et le suivi du béton en service et dans l'amélioration de la qualité. Il spécifie également les exigences (moyens) de durabilité des structures et prend en compte les classes d'exposition avec précision.

Le mémoire se compose de trois chapitres :

Le premier chapitre du début est une simple étude biographique sur le ciment et le béton en général, puis nous avons abordé la définition des maladies affectant le béton, les types de maladies, ainsi que le mécanisme d'émergence de ces maladies et les causes de dégradation et l'étude de la résistance du béton et d'indicateurs spécifiques de ces maladies.

Le deuxième chapitre explique les spécifications de la norme NF EN 206-1 et son domaine d'application, ainsi que les exigences et spécifications du béton.

Dans le troisième chapitre, nous avons conçu les mélanges de béton: nous avons abordé la détermination des quantités et relevé des ratios de béton et de composants de béton (ciment + eau + sable + agrégats), suivi du processus sous forme de béton (DREUX-GORISS).

Les mots clés :

Béton, durabilité, classe d'exposition, formulation de béton

المخلص:

إن متانة الخرسانة هي تحملها لظروف التي صممت من اجلها وتعمل في محيطها في فترة طويلة من الزمن دون حدوث تلف لها، من اجل الحفاظ وديمومة على المنشآت العمرانية. و بمعنى آخر فإن المتانة هي مقاومة الخرسانة للتدهور سواء التدهور الناتج من عوامل خارجية أو من عوامل داخلية.

تهدف هذه المذكرة على تطبيق عملي للمعيار 206-1 على المنشآت الفنية. يتعلق هذا المعيار بالخرسانة جاهزة الاستخدام و الخرسانة المصنوعة في موقع البناء والخرسانة المنتجة في مصنع مسبقة الصنع. حيث يعتبر هذا المعيار أداة مهمة في طريقة وصف وصياغة وتصنيع و مراقبة الخرسانة في خدمتها وتحسين جودتها النوعية. كما

يحدد متطلبات (وسائل) متانة الهياكل، ويأخذ بعين الاعتبار فئات التعرض بدقة.

و تتكون المذكورة من ثلاث فصول :

الفصل الأول في بدايته يعتبر دراسة بيولوجرافية بسيطة للاسمنت والخرسانة بشكل عام ومن ثم تطرقنا إلى تعريف الأمراض التي تصيب الخرسانة وأنواع هاته الأمراض والية حدوثها أسباب تدهورها، و دراسة متانة الخرسانة و مؤشرات المحددة مع هذه الأمراض.

في فصل الثاني يشرح مواصفات معيار 1-206 و ميدان تطبيقه و متطلبات ومواصفات الخرسانة.

في فصل الثالث قمنا بتصميم خلطات الخرسانة، تطرقنا إلى هذا بتحديد كميات و بيان نسب و مكونات الخرسانة (الاسمنت + الماء + الرمل + الركام)، اتبعنا هذه العملية بطريقة صياغة الخرسانة (DREUX-GORISS).

الكلمات المفتاحية :

الخرسانة، المتانة، فئات العرض، صياغة

Introduction générale

Introduction générale

La présente Norme européenne est destinée à être appliquée en Europe, dans des conditions climatiques et géographiques diverses, avec différents niveaux de protection, et différentes traditions et expériences régionales bien établies. C'est pourquoi des classes de bétons et de propriétés du béton ont été introduites dans la présente norme. Lorsque de telles solutions générales n'ont pu être trouvées, les articles concernés autorisent l'application des normes nationales ou des dispositions en vigueur là où le béton est utilisé.

Lors de l'élaboration de cette Norme européenne, une attention particulière a été apportée à une approche performantielle pour les spécifications concernant la durabilité. Pour cela un recensement des méthodes de formulations fondées sur la performance et des méthodes d'essai a été effectué. Toutefois le CEN/TC 104 a conclu que ces méthodes n'ont pas encore atteint un degré de développement suffisant pour être décrites en détail dans cette norme. Cependant il prend acte que certains états membres ont atteint un niveau de confiance suffisant dans des essais et des critères locaux. Pour cette raison la présente norme permet la continuation et le développement de telles pratiques valides sur le lieu d'utilisation du béton en tant qu'alternative à l'approche prescriptive. Le CEN/TC 104 continuera à développer des méthodes performantielles pour l'évaluation de la durabilité au niveau européen.

Cette Norme européenne contient des règles d'utilisation des constituants qui sont couverts par une norme européenne. Les autres coproduits de procédés industriels, les matériaux recyclés, etc. sont, pour les emplois courants, fondés sur l'expérience locale. Jusqu'à l'élaboration et la mise à disposition de normes européennes pour ces produits, cette norme ne contiendra pas de règles pour leur usage mais fera référence aux normes nationales ou aux dispositions valides sur le lieu d'utilisation du béton.

Cette norme européenne définit les tâches du prescripteur, du producteur et de l'utilisateur. Par exemple le prescripteur est responsable de la spécification du béton, article 6, et le producteur est responsable de la conformité et du contrôle de production, articles 8 et 9. L'utilisateur est responsable de la mise en place du béton dans la structure. En pratique, il peut se faire que plusieurs entités spécifient des exigences à différents stades de la conception et de la construction, par exemple le client, le concepteur, l'entrepreneur, le sous-traitant responsable du bétonnage. Chacun est responsable de transmettre les exigences spécifiées en même temps que les exigences complémentaires, au maillon suivant de la chaîne jusqu'au producteur. Au sens de cette norme européenne, la compilation finale est désignée par le terme

«spécification». Inversement, le prescripteur, le producteur et l'utilisateur peuvent être la même personne (par exemple un entrepreneur réalisant la conception et la construction). Dans le cas du béton prêt à l'emploi, l'acheteur du béton frais est le prescripteur et il doit fournir les spécifications au producteur. Cette norme européenne traite également des échanges d'informations nécessaires entre les différentes personnes. Les questions contractuelles ne sont pas abordées. Lorsque des responsabilités sont attribuées aux parties en cause, ce ne sont que des responsabilités techniques [39].

Le mémoire est ainsi constitué de trois chapitres. Le premier chapitre concerne la pathologie du béton. Nous avons identifié certaines maladies qui affectent le béton. Les ouvrages en béton armé constituent le matériau composite le plus couramment employé. Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons.

Dans le deuxième chapitre, ce critère est présenté et défini de la norme NF EN 206-1, où est la partie importante et principale de cette mémoire.

Dans le troisième chapitre présente une partie de l'étude expérimentale, présentant les résultats menés sur un béton ordinaire, formulé par la méthode de Dreux - Gorisse.

Chapitre I: Pathologie et durabilité du béton

I.1. Introduction

Toute structure en béton armé doit être capable de remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue tout au long de sa durée de vie, pour atteindre cet objectif, il est souhaitable que le matériau composite béton-acier puisse résister aux détériorations et aux charges d'exploitation auxquelles il peut être soumis. Les phénomènes de dégradation des ouvrages en béton sont de la plus grande importance. En effet, le vieillissement généralisé des structures lié à l'exposition à un environnement pollué et agressif (tels que les chlorures ou le gaz carbonique) favorise des dommages d'origine chimique. Ces agents polluants peuvent réagir avec les constituants du béton et corroder les armatures. Ces désordres peuvent provoquer la réduction de la durée de vie de la structure et même la ruine prématurée de l'élément de structure.

Ce chapitre est consacré à l'étude du béton, dans un premier temps, sa définition et sa composition sont exposées. Des exemples de dégradation des structures, les principaux mécanismes d'endommagement sont présentés, et enfin, la durabilité des bétons est discutée.

I.2. Le béton

Le béton est un assemblage de granulats, par un mélange de ciment, éventuellement d'additions minérales et / ou d'adjuvants organiques, et d'eau.

Un bref historique du béton ainsi que ses principaux composants sont décrits ci dessous [1], [2].

I.2.1. Un peu d'histoire

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Il est formulé en fonction de l'usage auquel il est destiné et utilisé essentiellement pour la construction d'ouvrages de génie civil et d'architecture.

Vers 2600 avant JC, les Assyriens et les Babyloniens ont employé l'argile comme un matériau liant, c'est à dire comme le ciment. Les Egyptiens ont utilisé un ciment à base de chaux et de gypse.

Le béton dans son sens actuel fut introduit par l'ingénieur Bélidor dans "L'architecture hydraulique" en 1737. L'invention du ciment par Vicat en 1817, puis celle du ciment Portland par Aspdin en 1824 préparèrent l'avènement du béton [3].

En 1756, un ingénieur anglais, John SMEATON a fait le premier béton moderne (ciment hydraulique) en utilisant l'addition de gravillons naturels ressemblants aux graviers et d'un mélange de briques pulvérisées comme ciment.

En 1849, un jardinier parisien, Joseph MONIER a inventé le béton armé à partir de l'idée de renforcer les bacs à fleurs qu'il construisait en béton en y incorporant des barres en fer. Cette nouvelle invention a été brevetée en 1867. Cette armature métallique permet au béton de supporter partiellement les contraintes de traction .

En 1928, un ingénieur français, Eugène FREYSSINET a inventé le béton précontraint par fils adhérents. Sans son invention, largement utilisée par ses successeurs dans le monde entier, de nombreux ouvrages contemporains (exemple, Figure I.1) n'auraient pu être construits ou le seraient différemment.



Figure I.1: Pont de Normandie avec 856 mètres de travée centrale.

I.2.2.Composants

Une proportion précise des composants du béton est fondamentale pour obtenir les caractéristiques mécaniques visées pour la structure finale. Ces composants sont énoncés ci-dessous:

I.2.2.1. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment conforme à l'EN 197-1, appelé ciment CEM, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance prescrits et aussi présenter une stabilité de volume à long terme.

Le durcissement hydraulique du ciment CEM est principalement dû à l'hydratation des silicates

de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tels que, par exemple, les aluminates. Dans les ciments CEM, la somme des quantités relatives d'oxyde de calcium (CaO) et de dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit représenter une proportion au moins égale à 50 % en masse, lorsqu'elles sont déterminées selon l'EN 196-2.

Les ciments CEM sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène du fait d'une assurance qualité couvrant les processus de production et de manutention. Le lien entre ces processus de production et de manutention et la conformité du ciment à l'EN 197-1 est défini dans l'EN 197-2.

I.2.2.1.1. Constituants

Le ciment est obtenu à partir d'un ou plusieurs constituants.

- **Propriétés hydrauliques:** C'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau.
- **Propriétés pouzzolaniques:** C'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés, stables.
- **Propriétés physiques:** Elles améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...).
- **Clinker Portland (K):** Le clinker Portland est obtenu par cuisson, au moins jusqu'à fusion partielle, d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, pâte ou suspension) contenant du CaO, SiO₂, Al₂O₃ apportés par les calcaires et argiles de roches soigneusement sélectionnées. Ce constituant entre dans la composition de tous les ciments.

I.2.2.1.2. Différents types de ciment

Le Tableau 1 donne les 27 produits de la famille des ciments courants traités dans la présente partie de l'EN 197:1999 ainsi que leurs notations. Ils sont regroupés en cinq types principaux qui sont les suivants:

- Ciment Portland Artificiel (CEM I)
- Ciment Portland Composé (CEM II)

- Ciment de Haut-Fourneau (CEM III)
- Ciment Pouzzolanique (CEM IV)
- Ciment Composé (CEM V)

La composition des différents ciments doit être conforme au tableau I.1.

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)	Composition (pourcentage en masse) ^{a)}											
		Constituants principaux									Constituants secondaires		
		Clinker K	Laitier de haut fourneau uS	Fumée de silice D	Pouzzolane s	Cendres volantes	Schiste calciné T	Calcaire					
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM III/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
Ciment Portland composé ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	6-20									0-5	
	CEM II/B-M	65-79	21-35									0-5	
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment	CEM IV/A	65-89	—	11-35					—	—	—	0-5

	<i>pouzzolanique^{c)}</i>	<i>CEM IV/B</i>	45-64	—		36-55	—	—	—	—	0-5
CEM V	<i>Ciment composé^{c)}</i>	<i>CEM V/A</i>	40-64	18-30	—	18-30	—	—	—	—	0-5
		<i>CEM V/B</i>	20-38	31-50	—	31-50	—	—	—	—	0-5

Tab I.1 : Les 27 produits de la famille des ciments courants

I.2.2.1.3. Exigences mécaniques, physiques, chimiques et de durabilité

A. Exigences mécaniques

❖ Résistance courante

La résistance courante d'un ciment est la résistance à la compression déterminée conformément à la norme EN 196-1, mesurée à 28 jours. Elle doit être conforme aux exigences du tableau 2.

Trois classes de résistance courante sont couvertes: classe 32,5 ; classe 42,5 ; classe 52,5 (voir tableau 2).

❖ Résistance à court terme

La résistance à court terme d'un ciment est la résistance à la compression, déterminée conformément à la norme EN 196-1, après 2 ou 7 jours. Elle doit être conforme aux exigences du tableau I.2.

À chaque classe de résistance courante, correspondent deux classes de résistance à court terme, une classe de résistance à court terme ordinaire, notée N, et une classe de résistance à court terme élevée, notée R (voir tableau I.2).

<i>Classe de résistance</i>	<i>Résistance à la compression</i>				<i>Temps de début de prise</i>	<i>Stabilité (expansion)</i>
	<i>MPa</i>					
	<i>Résistance à court terme</i>		<i>Résistance courante</i>			
	<i>2 jours</i>	<i>7 jours</i>	<i>28 jours</i>			
				<i>Min</i>	<i>Mm</i>	
32,5 N	—	$\leq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	≥ 75	$\square 10$
32,5 R	$\geq 10,0$	—				
42,5 N	$\geq 10,0$	—	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	≥ 60	
42,5 R	$\geq 20,0$	—				

52,5 N	$\geq 20,0$	—	$\geq 52,5$	—	≥ 45
52,5 R	$\geq 30,0$	—			

Tab I.2 : Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques.

B. Exigences physiques

❖ Temps de début de prise

Déterminé selon l'EN 196-3, le temps de début de prise doit satisfaire aux exigences du tableau 2.

❖ Stabilité

Déterminée selon l'EN 196-3, l'expansion doit satisfaire aux exigences du tableau I.2 .

C. Exigences chimiques

Déterminées conformément aux normes citées dans la colonne 2 du tableau I.3, les propriétés des ciments des types et classes de résistance figurant respectivement aux colonnes 3 et 4 de ce tableau doivent être conformes aux valeurs figurant à la colonne 5.

D. Exigences de durabilité

Dans de nombreuses applications, et notamment dans des conditions environnementales particulièrement sévères, le choix du ciment a une influence sur la durabilité du béton, du mortier et des coulis, par exemple vis-à-vis de la résistance au gel, de la résistance à l'action de substances chimiques, et vis-à-vis de la protection des armatures.

Le choix du ciment à partir de l'EN 197-1, en particulier le choix du type et de la classe de résistance, en fonction de l'utilisation et de la classe d'exposition, doit se faire en appliquant les normes et/ou règlements relatifs au béton ou au mortier, en vigueur sur le lieu d'utilisation.

1	2	3	4	5
Propriétés	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences ^{a)}
Perte au feu	EN 196-2	CEM I CEM III	toutes classes	$\leq 5,0 \%$
Résidu insoluble	EN 196-2 ^{b)}	CEM I CEM	toutes classes	$\leq 5,0 \%$

		III		
Sulfate (SO ₃)	EN 196-2	CEM I	32,5 N	≤ 3,5 %
		CEM II	32,5 R	
		c) CEM	42,5 N	
		IV	42,5 R	≤ 4,0 %
		CEM V	52,5 N	
		CEM III d)	52,5 R	toutes classes
Chlorure	EN 196-21	tous types e)	toutes classes	≤ 0,10 % f)
Pouzzolanité	EN 196-5	CEM IV	toutes classes	satisfait à l'essai

Tab I.3 : Exigences chimiques définies en termes de valeurs caractéristiques

I.2.2.1.4. Critères de conformité

La conformité des 27 produits à l'EN 197-1 doit être évaluée en continu sur la base d'essais effectués sur des échantillons ponctuels. Les propriétés, les méthodes d'essai et les fréquences minimales d'essais applicables pour les essais d'autocontrôle du fabricant sont spécifiées .

En ce qui concerne la fréquence des essais de ciment ne faisant pas l'objet d'une distribution ininterrompue ainsi que pour d'autres détails, voir l'EN 197-2.

Pour la certification de conformité par un organisme de certification agréé, la conformité du ciment à l'EN 197-1 doit être évaluée conformément à l'EN 197-2.

I.2.2.1.5. Critères de conformité pour les propriétés mécaniques, physiques et chimiques et méthode d'évaluation

Le ciment est réputé conforme aux exigences portant sur les propriétés mécaniques, physiques et chimiques énoncées dans l'EN 197-1 si les critères de conformité spécifiés en 9.2.2 et 9.2.3 sont remplis. La conformité doit être évaluée sur la base d'un échantillonnage continu sur des échantillons ponctuels prélevés aux points de délivrance du produit et sur la base des résultats d'essai obtenus sur l'ensemble des échantillons d'autocontrôle prélevés au cours de la période de contrôle.

I.2.2.2. Eau de gâchage

Il est important de respecter les proportions de tous les composants, spécialement de l'eau de gâchage. Par exemple, trop d'eau augmente la porosité du béton et modifie ses propriétés mécaniques et sa durabilité.

L'association ciment – eau génère des réactions extrêmement complexes. Silicates et aluminates se développent pendant la phase d'hydratation. Ils forment alors un gel cristallin qui marque le début du phénomène de "prise".

Au cours de la phase de durcissement, qui peut durer plusieurs mois, la multiplication des microcristaux augmentent les résistances mécaniques. Le béton se transforme, alors, en une véritable roche composite.

I.2.2.3. Granulats

Les granulats constituent la phase dominante du béton, (**70%** du volume) et se caractérisent par les propriétés intrinsèques de la roche dont ils sont issus: coloration, caractéristiques mécaniques et physico-chimiques. Ils vont influencer directement les propriétés esthétiques, mécaniques et la durabilité du béton. Le granulats est généralement composé de fillers, de sable, de gravier, de pierres concassées, de galets ou de cailloux (selon sa dimension). Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sable et de gravier d'origine alluvionnaire, terrestre ou maritime, en concassant des roches massives, ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition.

I.2.2.4. Adjuvants

Les adjuvants sont incorporés au béton en faible quantité (moins de 10 kg/m³). Les réducteurs d'eau vont permettre soit d'utiliser moins d'eau pour une qualité égale, soit de réaliser un béton très fluide avec une quantité d'eau moindre. Les superplastifiants ou fluidifiants possèdent des propriétés similaires à celles des réducteurs d'eau, mais avec une efficacité beaucoup plus importante. Ils permettent des fluidités extrêmes et sont utilisés pour produire des bétons autoplaçants et autonivelants.

I.2.2.5. Les additions

Les additions sont définies dans la norme NF EN 206-1 « Béton . Partie 1 :Spécification , performances, production, et conformité » d'avril 2004. Une addition est un « matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou

pour lui conférer des propriétés particulières ».

Les additions (fillers, cendres volantes, fumées de silices...) ont deux modes d'action:

- Un effet sur la granulométrie, dit également « effet filler », qui est un remplissage par les éléments les plus fins (de taille inférieure à 80 μm) des vides laissés par les éléments les plus gros (sables) et, éventuellement, une contribution directe à la résistance par la formation d'hydrates, en général à long terme.

I.2.2.6. Les ajouts [4]

Un ajout est un produit (en dehors du ciment, des granulats, des additions, des adjuvants et de l'eau) incorporé au béton tels que l'inhibiteur de corrosion qui, incorporé dans le béton lors de sa fabrication, peut ralentir le phénomène de corrosion des armatures, et les fibres métalliques et synthétiques qui lui confère de la résistance.

I.2.3. Formulation

Les bétons sont conçus suivant une formulation, donnée sous forme de quantité massique de chaque composant afin d'obtenir un volume de 1 m³ de béton. Il existe différentes méthodes de formulations, qui visent à optimiser l'empilement des différentes particules (grains de ciment, sable, gravillons) afin de minimiser les espaces vides [5].

Le choix de la formulation permet d'obtenir des propriétés mécaniques ou de mise en œuvre recherchées .

I.2.4. Propriétés mécaniques des bétons

Les propriétés mécaniques du béton sain dépendent de la qualité des constituants, de la formulation et les conditions de cure. Les propriétés de différents bétons seront donc très variables [6].

Pour les ouvrages, on caractérise généralement les bétons par leur résistance à la compression R_c , généralement déterminée après 28 jours de cure. La résistance à la traction R_t peut également être déterminée, elle traduit alors la résistance à la fissuration du béton, on peut citer aussi comme propriétés le module d'élasticité E , le coefficient de Poisson ν et la masse volumique du béton [5].

Une autre propriété mécanique importante du béton est la porosité. Elle est définie comme le volume total des vides contenus dans le béton pour 1 m³ de matériau. Cette porosité augmente

avec le rapport E/C et est en général comprise entre 11 et 18%. Elle est constituée de pores plus ou moins inter-connectés, ainsi que de micro ou macro-fissurations. Les dimensions caractéristiques des pores vont d'une dizaine de nanomètres au millimètre. Ils peuvent être remplis d'air ou d'eau libre.

I.3. La pathologie du béton

Les ouvrages en béton armé constituent le matériau composite le plus couramment employé. Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons [7] [8].

La détermination précise des causes d'une détérioration quelconque du béton est un sujet complexe. Ceci s'explique par le manque de connaissance et la complexité des phénomènes qui affectent ce matériau, à leur évolution dans le temps, ainsi qu'à leur concomitance.

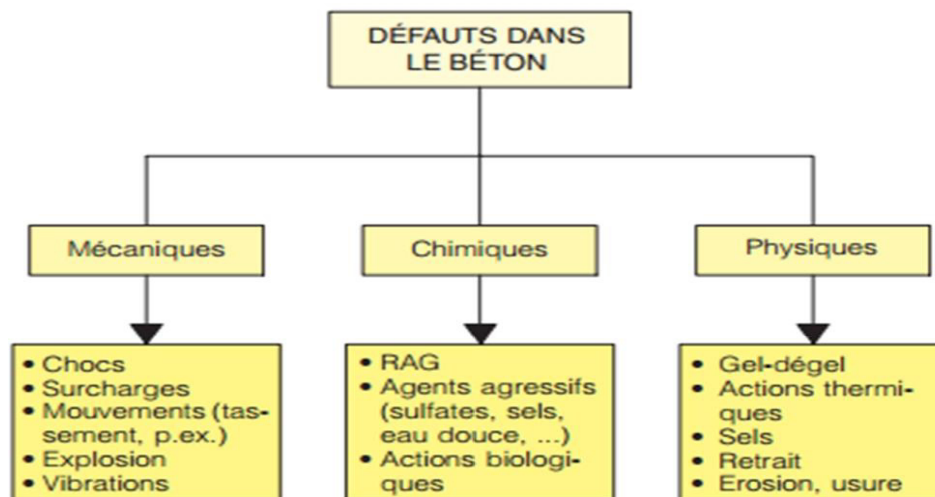


Figure I.2: Dégradations de béton arme

I.3.1. Les causes physiques de dégradation des bétons

➤ Abrasion

C'est l'usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif, ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.

➤ **L'érosion**

C'est la perte de matière, résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement (usure de la matrice cimentée par les particules solides contenues dans l'eau).

➤ **La cavitation**

C'est l'usure d'une structure hydraulique, caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur, qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau (effet dynamique de l'eau).

➤ **Les chocs**

Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils.



Figure I.3: Intrados des ponts dégradés



Figure I.4: Barrières de retenue dégradée

➤ **Les surcharges**

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton.

➤ **Le feu**

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.

I.3.2. Les cycles gel / dégel

Parmi les actions susceptibles de provoquer des dégradations des ouvrages ou des voiries, le gel peut constituer un facteur particulièrement actif, notamment lorsqu'il s'accompagne de cycles de gel et de dégel rapidement alternés.

Les dégradations par le gel ne peuvent intervenir que lorsque les matériaux sont au contact de l'eau, dans un état voisin de la saturation. Le béton durci, dans la majorité des cas, résiste aux effets du gel, il arrive cependant que des conditions climatiques particulièrement sévères puissent entraîner la dégradation des bétons mal formulés, mis en œuvre de façon incorrecte et, de surcroît, saturés d'eau.

Le gel n'est donc susceptible d'occasionner des dégradations aux ouvrages en béton que dans des cas limités, où se trouvent simultanément réunies plusieurs conditions défavorables.

A l'action du gel, il faut ajouter celle des fondants (plus couramment appelés sels de déverglaçage), utilisés sur les routes, les pistes, les parkings, qui peuvent affecter les ouvrages voisins par rejaillissement: piles de ponts, bordures de trottoirs, murs de soutènement.

I.3.2.1. Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel et aux sels de déverglaçage

Les recommandations de niveau national relatives à la prévention contre les mécanismes développés par le gel font l'objet d'un guide technique édité par le lpc en décembre 2003 intitulé "recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel".

Les recommandations concernent les bétons réalisés sur chantier, en usines de préfabrication et en centrales de béton prêt à l'emploi pour les ouvrages relevant du domaine du génie civil, conçus pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans.

Elles permettent :

- De maîtriser les agressions pouvant résulter des cycles gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage
- De formuler et de confectionner des bétons durables en ambiance hivernale.

Nota : les produits préfabriqués disposant d'une certification intégrant les risques liés au gel-dégel ne sont pas concernés par ces recommandations.

Le document précise les dispositions relatives à l'élaboration des bétons traditionnels, des bétons à hautes performances et des bétons à technologie spécifique : béton à démoulage immédiat (bétons fabriqués en usine de préfabrication), bétons moulés sur site avec une machine à coffrage glissant et bétons projetés.

I.3.2.2. Les mécanismes développés par le gel

Les dégradations occasionnées par le gel sont de deux types:

- Une fissuration répartie dans la masse du béton, provoquée par un mécanisme de gel interne (voir figure I.5).
- Un délitage de la zone superficielle, appelé écaillage, qui résulte d'un gradient thermique important au voisinage de la surface, (voir figure I.6).

Ces deux types de dégradations, qui peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, sont dus à des mécanismes distincts, [8 et 10], l'action répétitive de cycles de gel et de dégel, ou une brusque chute de température superficielle généralement provoquée par l'action des sels de déverglaçage.



Figure I.5: Fissuration interne [8]

Figure I.6: Écaillage de la surface [8]

I.3.2.3. Action des cycles gel-dégel

Il est généralement admis que l'accroissement de volume, de l'ordre de 9 %, accompagnant la transformation de l'eau en glace (le béton contient toujours de l'eau non combinée, une partie de cette eau gèle dès que la température descend de quelques degrés en dessous de 0 °C) n'est pas la seule cause de la dégradation du béton. Dans la zone atteinte par le gel, des cristaux de glace se forment dans les plus gros capillaires, créant un déséquilibre thermodynamique qui va déclencher une migration de l'eau des capillaires les plus fins vers les capillaires dans lesquels l'eau est gelée (l'eau dans les capillaires les plus fins restant à l'état liquide). C'est l'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, engendré par ces mouvements de l'eau interne non gelée vers les « fronts de congélation », ainsi que les pressions osmotiques créées par les différences de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée (présente dans les capillaires fins), qui est considéré aujourd'hui comme la cause principale des dégradations [9].

I.3.2.4. Action des sels de déverglaçage

La cause principale des dégradations de surface pouvant résulter de la diffusion des sels de déverglaçage dans les capillaires du béton est un accroissement des pressions osmotiques. L'importante chute de température de surface, due à la quantité de chaleur consommée pour provoquer la fusion de la glace, amplifie les effets du gel dans la zone du béton proche de la surface (la chute de température de surface peut atteindre 4 °C/minute au lieu de 4 °C/heure habituellement). Mais ce phénomène est rarement générateur d'un écaillage, car les sels de déverglaçage sont répandus dans la plupart des cas à titre préventif sur les ouvrages d'art des réseaux routier et autoroutier, pour garantir la sécurité des usagers. Il n'y a donc pas de film de glace lorsque les sels sont répandus [9].



Figure I.7 : Corrosion des armatures consécutive à la fragilisation du béton d'enrobage et à l'utilisation des sels de déverglage.

I.3.2.5. Béton avec adjuvant entraîneur d'air

L'entraîneur d'air permet de maintenir dans le béton une partie des bulles d'air créées lors du malaxage : tailles des bulles 5 à 10 microns .

Pour protéger la pâte cimentaire, il faut que les bulles d'air soient suffisamment rapprochées afin que les contraintes internes générées par le gel soient inférieure à la résistance de la pâte.

- Facteur d'espacement des bulles d'air : \bar{I} (1 barre)
- Demi distance moyenne qui sépare les parois de 2 bulles adjacentes
- Facteur d'espacement inférieur à 200 μm est considéré suffisant pour une bonne protection des bétons contre le gel.

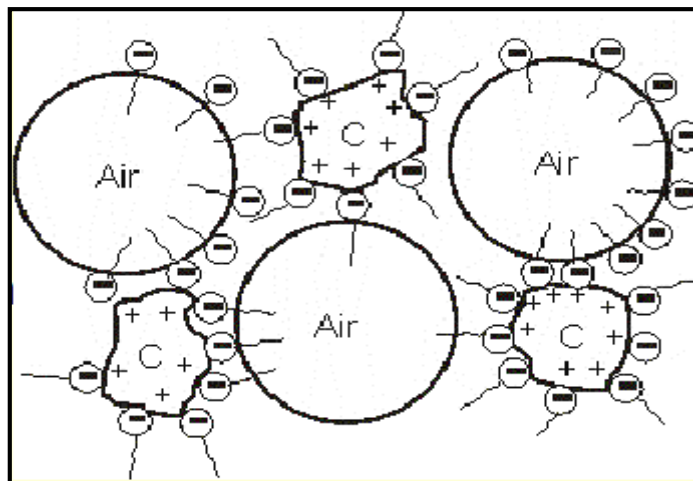


Figure I.8 : L'entraînement d'air dans les bétons.

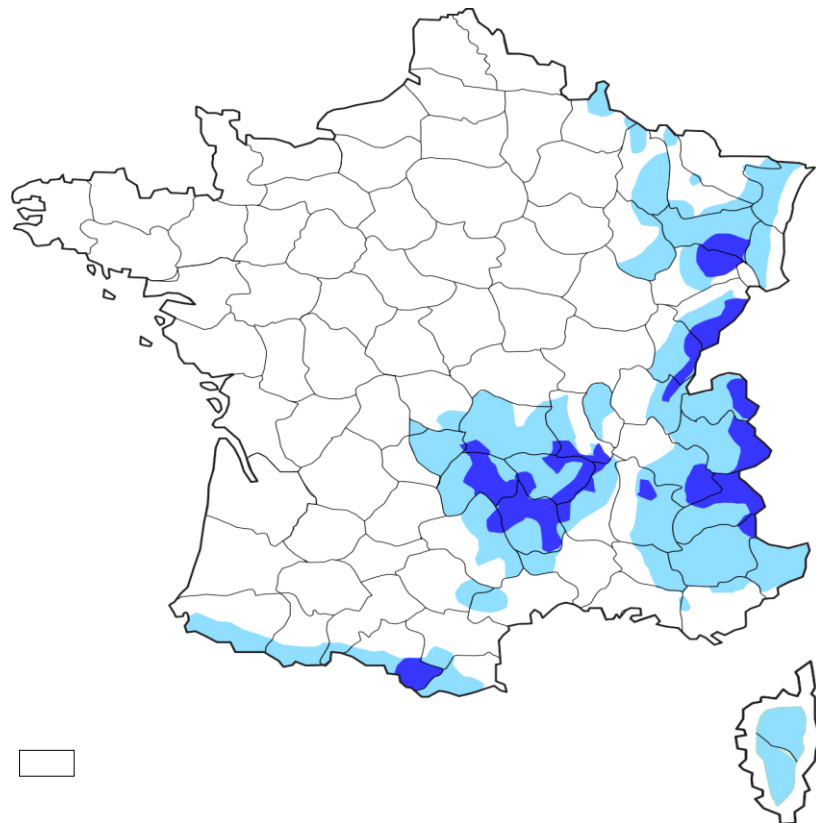
I.3.2.6. Classes d'exposition

La norme nf en 206/cn définit quatre classes d'exposition pour les bétons soumis à l'action du gel et/ou aux sels de déverglaçage.

- ✓ XF1: gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage.
- ✓ XF2: gel faible ou modéré avec agents de déverglaçage.
- ✓ XF3: gel saturé, sans agent de déverglaçage.
- ✓ XF4: gel saturé, avec agents de déverglaçage.

I.3.2.7. Carte de gel et salage

Figure I.9 : Carte des zones de gel en France



Gel faible ou modéré:

Sans agents de déverglaçage: XF1

Avec agents de déverglaçage: XF2

Gel sévère :

Sans agents de déverglaçage: XF3

Avec agents de déverglaçage : XF4

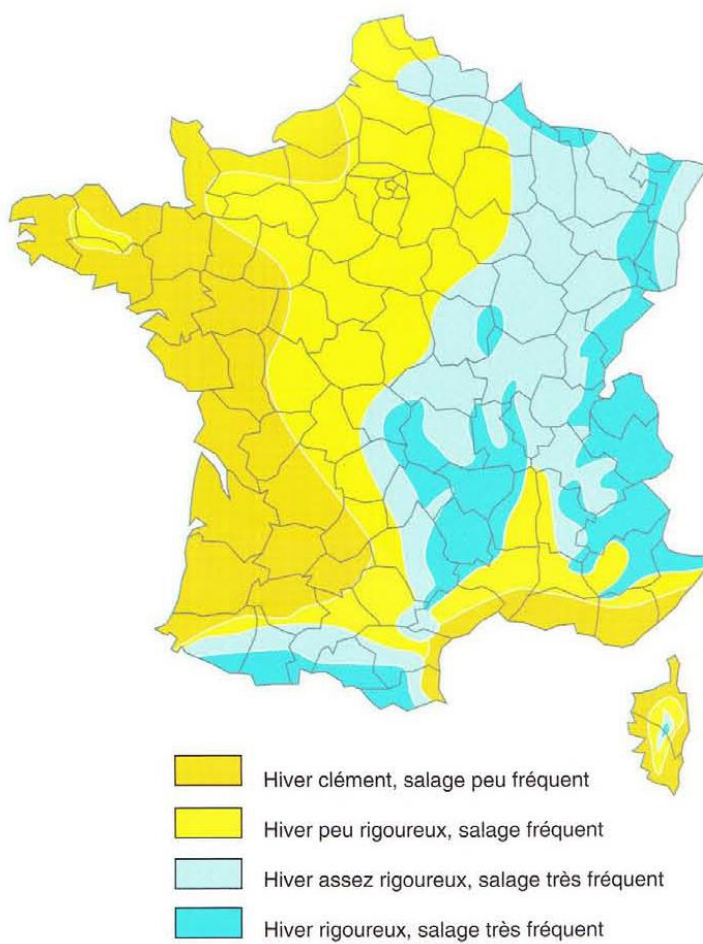
Gel modéré ou sévère :

Suivant l'altitude

- Gel faible: moins de 3 jours/an avec une température $< - 5 \text{ } ^\circ \text{c}$.
- Gel sévère: plus de 10 jours/an avec une température $< - 10 \text{ } ^\circ \text{c}$.
- Gel modéré: dans les autre.

❖ Carte de salag

Figure I.10 : Carte des zones de salage en France



❖ Niveau de salage

Les niveaux de salage sont définis par référence à la carte des zones de rigueur hivernale hi (setra de novembre 1994 «aide à l'élaboration du dossier d'organisation de la viabilité hivernale »).

N = nombre de jours de salage

- Salage peu fréquent $n < 10$ h1
- Salage fréquent $10 < n < 30$ h2
- Salage très fréquent $n \geq 30$ h3 et h4

I.3.2.8. Différents types de béton

Selon le niveau de gel auquel est soumis l'ouvrage et le niveau de salage, on distingue quatre types de bétons

Niveau de salage	Niveau de gel	
	Modéré	Sévère
Peu fréquent	Béton adapté*	Béton g
Fréquent	Béton adapté* avec : Teneur en air minimale = 4% Ou essais de performance	Béton g + s
Très fréquent	Béton g + s	Béton g + s

Tab I.4: Différents type de béton [9].

Béton adapté : béton conforme aux normes en vigueur,

(norme nf en 206/cn, normes de produit) et possédant une bonne compacité.

- Béton adapté : béton soumis au gel modéré sans eau avec peu de sels de déverglaçage (salage peu fréquent) :XF1
- Béton adapté avec teneur en air minimale = 4 % ou essais de performance : béton soumis au gel modéré en présence de sels de déverglaçage (salage fréquent) : (XF2)
- Bétons résistant au gel pur : béton soumis au gel sévère sans sel de déverglaçage ; ces bétons sont dénommés béton g (béton formulé pour résister au gel interne seul) : (XF3)
- Bétons résistant au gel en présence de sels de déverglaçage : béton soumis au gel modéré et sévère en présence de sels de déverglaçage. Ces bétons sont dénommés béton

g + s (béton formulé pour résister au gel interne et à l'action des sels de déverglaçage) :
(XF2 ou XF4)

Seuls les bétons g et g + s font l'objet de prescriptions particulières.

I.3.3. Carbonatation du béton

I.3.3.1. Généralité

Le béton étant un milieu globalement basique ($\text{pH} > 13$), les altérations chimiques sont dues essentiellement aux actions extérieures des sels en présence d'eau. Dans la plupart des cas, elles agissent sur la pâte de ciment en entraînant soit la dissolution de certains hydrates (comme la portlandite), ce qui entraîne une perte d'alcalinité, soit la formation de composés nouveaux qui peuvent être expansifs [13].

La pénétration des agents agressifs, jouent un rôle déterminant aussi bien sur la cinétique des réactions que sur l'intensité des dégradations.

I.3.3.2. Action du gaz carbonique (carbonatation)

Le béton, presque toujours en contact avec l'air ambiant, est soumis à l'action du gaz carbonique (CO_2), la teneur en CO_2 de l'air, naturellement de l'ordre de 0,03% à 0,05% en volume, varie avec la température, et le milieu environnant. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 0,1%; dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1%. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de CO_2 .

Ce gaz carbonique atmosphérique, inerte vis-à-vis des bétons à l'état gazeux, se dissout facilement dans l'eau pour donner une solution d'acide carbonique (H_2CO_3) susceptible d'altérer le béton [11].

I.3.3.2.1 Mécanisme de la carbonatation

Le processus de carbonatation, qui correspond à la réaction du CO_2 avec tous les hydrates du ciment et plus particulièrement avec la chaux hydratée, est généralement schématisé de la manière suivante:

A. Réaction chimique

Le dioxyde de carbone dissout dans la solution interstitielle du béton peut réagir avec les

produits d'hydratation du clinker que sont la portlandite Ca(OH)_2 et les silicates de calcium hydratés, pour former du carbonate de calcium CaCO_3 . La dégradation proviendrait essentiellement de la réaction avec la portlandite selon l'équation bilan suivante :



Il s'agit d'un bilan, mais plusieurs équilibres chimiques et leurs constantes interviennent dans le processus de carbonatation. La réaction de carbonatation nécessite ainsi le passage du CO_2 en phase aqueuse (2), des réactions acido- basiques impliquant les ions carbonates (3,4) et l'eau (5), la dissolution de la portlandite (6), et la précipitation du carbonate de calcium (7).



B. Processus physiques

Le dioxyde de carbone est dans l'air et pénètre dans le béton par le réseau poreux et les fissures. Il se dissout alors dans l'eau présente dans le béton pour réagir avec la portlandite et les silicates de calcium hydratés (C-S-H), pour former du carbonate de calcium et libérer de l'eau.

L'eau libérée par la réaction entraîne une augmentation du taux de saturation. Or la vitesse de migration du dioxyde de carbone est beaucoup plus faible dans l'eau que dans l'air car le coefficient de diffusion du CO_2 en phase aqueuse est 10^4 fois plus faible qu'en phase gazeuse globalement [20], cela se traduit par une diffusion plus faible du dioxyde de carbone dans le béton, et comme la portlandite devient de moins en moins accessible, raison de la formation du carbonate de calcium, la vitesse du front diminue donc au fur et à mesure de sa progression.

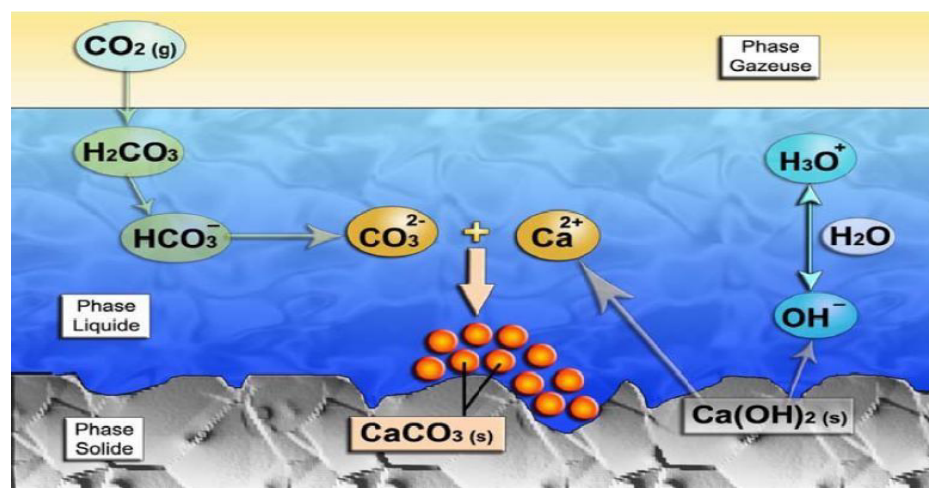


Figure I.11: Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [11]**I.3.3.3. Corrosion des armatures liées à la carbonatation**

La carbonatation de la matrice cimentaire diminue le pH de la phase aqueuse des pores du béton qui n'offre alors plus de protection à l'acier.

I.3.3.3.1. Corrosion des armatures du béton armé

La solution dans les pores du béton est une solution alcaline qui a un pH proche de 13.

Pour les structures exposées à l'air dans des conditions normales. Les mesures de potentiel électrique des armatures donnent généralement des valeurs variant entre $-0,2\text{ V}$ et $0,1\text{ V}$ dans un tel milieu, l'acier est passivé. Or La carbonatation du béton entraîne une baisse du PH à une valeur d'environ 9 . Dans ce milieu, L'armature voit alors son potentiel électrique chuter vers les valeurs négatives. Elle se retrouve dans une zone de corrosion .La pathologie qui apparaît et une corrosion généralisée se traduisant par une diminution progressive de la section des armatures. De plus, La formation de rouille expansive exerce une pression sur le béton entourant l'armature, Cette pression est souvent suffisante pour provoquer l'éclatement du béton d'enrobage.

La présence d'eau est très importante pour la corrosion car elle diminue la résistance électrique. Ainsi, la corrosion est essentiellement un problème pour les bétons humides, mais non saturés d'eau puisque la vitesse de diffusion de l'oxygène devient comparativement nulle dans l'eau par rapport à celle dans l'air. L'estimation générale de la vitesse de corrosion est maximale pour une humidité relative proche de 95% [12].

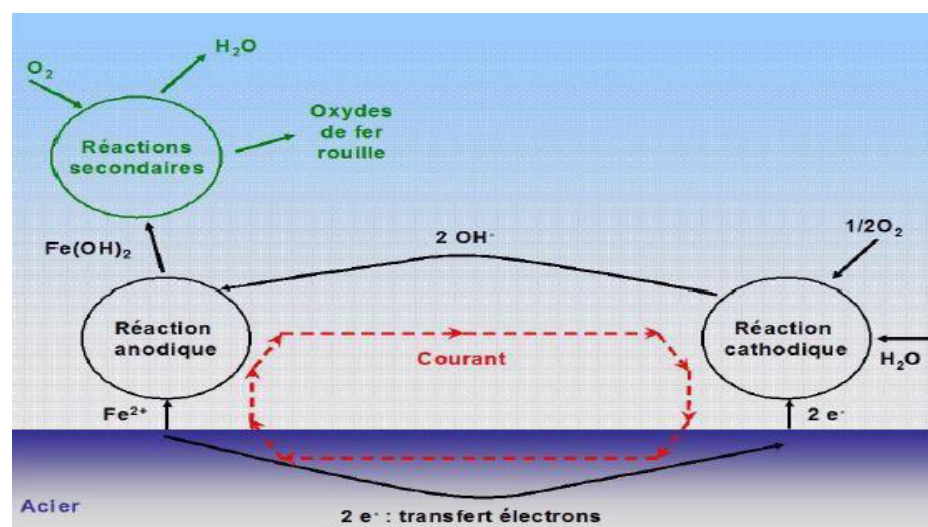


Figure I.12: Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers. [10]

I.3.3.3.2. Les étapes de la corrosion des armatures

La corrosion avec formation de rouille dans les bétons armés comporte deux phases :

- Les éléments agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou les chlorures (Cl), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton. C'est le stade d'incubation.
- La seconde phase est celle dite de propagation qui commence lorsque ces corps agressifs se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des armatures. Elle correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

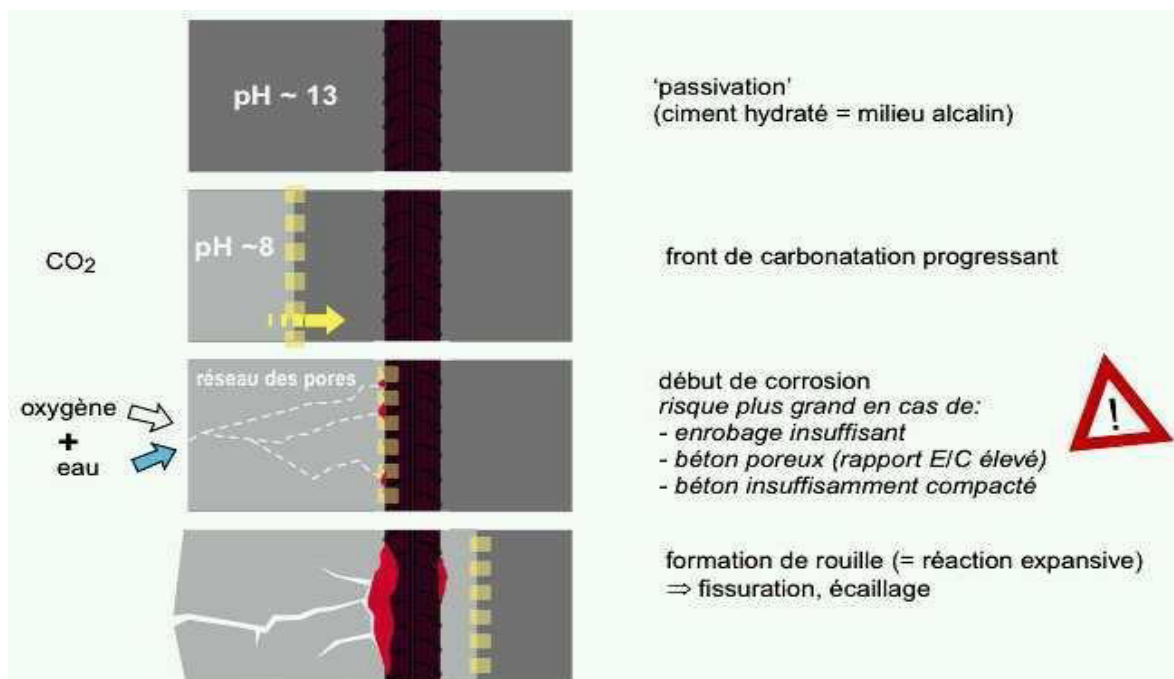


Figure I.13: Représentation schématique des étapes de corrosion des armatures du béton causé par CO_2

I.3.3.4. Profondeur de la carbonatation

Du point de vue de la corrosion liée à la carbonatation, la vie de service d'une structure armée est subdivisée en une période d'initiation et une période de propagation de la corrosion. Il est

indispensable de pouvoir estimer l'état de progression de la carbonatation dans la couche de béton d'enrobage, afin de savoir si le premier lit d'armatures est en danger ou d'estimer quand il sera. La profondeur de carbonatation est mesurée au moyen d'un indicateur de PH, la phénolphthaléine, dont le pH de virage se situe autour de 9. Le béton non carbonaté se colore en rose tandis que le béton carbonaté ne change pas de couleur. M. Hamada [10] montre que la corrosion peut être initiée pour un PH compris entre 10 et 11.

Le dioxyde de carbone pénètre au-delà de la profondeur de carbonatation détectée par projection de phénolphthaléine et peut avoir déjà induit une chute de PH suffisante pour qu'il y ait corrosion des aciers [11].

I.3.3.5. Mesures prévention préconisées par les norms

Plusieurs normes ont établi des prescriptions en vue de prévenir la corrosion induite par la carbonatation, ainsi:

- La norme NF EN 206-1 [19] et son supplément belge, la NF B 15-001 [22], proposent un dosage minimum en ciment et un rapport eau-ciment maximum
- Quant à l'Eurocode 2 [21], il exige un enrobage minimum des armatures
- Enfin, le projet de norme européenne prEN 13670 [20] et la norme NF EN 13369 [18] recommandent une durée de cure minimale.

I.3.3.6. Dosage minimum en ciment et rapport eau-ciment maximum

La norme NF EN 206-1 considère qu'un ouvrage en béton est durable s'il résiste de manière satisfaisante, tout au long de sa durée d'utilisation, à l'environnement auquel il est exposé. Elle définit plusieurs classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement. Les actions liées à la corrosion induite par la carbonatation correspondent aux classes XC1 à XC4, qui s'appliquent aux ouvrages en béton renfermant des armatures ou des pièces métalliques, exposés à l'air et à l'humidité (tableau I.7). A chacune de ces classes, la norme NBN B 15-001 associe des types de béton caractérisés par un dosage minimum en ciment C_{\min} et un rapport eau-ciment maximum E/C_{\max} (tableau I.8).

Selon la norme NF EN 206-1, le concepteur de l'ouvrage doit considérer l'ensemble des mécanismes potentiels de dégradation. Pour simplifier le travail du prescripteur, la norme NF 15-001 a défini des classes d'environnement applicables aux conditions couramment rencontrées en Belgique. Cette classification tient compte à la fois de la carbonatation et des autres mécanismes de dégradation tels que le gel, la pénétration de chlorures, etc.

<i>Classe</i>	<i>Environnement</i>	<i>exemples informatifs</i>
<i>XC1</i>	<i>Sec ou humide en permanence</i>	<i>Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau.</i>
<i>XC2</i>	<i>Humide, rarement sec</i>	<i>Surfaces de béton soumises au contact pro- longé de l'eau. Un grand nombre de fondations.</i>
<i>XC3</i>	<i>Moyennement humide</i>	<i>Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'hu- midité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie.</i>
<i>XC4</i>	<i>Alternativement humide et sec</i>	<i>Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2.</i>

Tab I.5 : Classes d'exposition associées à la corrosion par carbonatation [14]

<i>Paramètre</i>	<i>Classe XC1</i>	<i>Classe XC2</i>	<i>Classe XC3</i>	<i>Classe XC4</i>
	<i>Béton T(0,65)</i>	<i>Béton T(0,60)</i>	<i>Béton T(0,55)</i>	<i>Béton T(0,50)</i>
<i>C_{min} (kg/m³)</i>	260	280	300	320
<i>E/C_{max}</i>	0,65	0,60	0,55	0,50

Tab I.6: Exigences de durabilité vis-à-vis de la carbonatation associées aux classes d'exposition [15].

I.3.3.7. Paramètres influençant la carbonatation

Les paramètres qui sont prépondérants dans le mécanisme de carbonatation sont liés à l'accessibilité au dioxyde de carbone (point de vue physique) et à la quantité de matière carbonatable (point de vue chimique).

I.3.3.7.1. Paramètre de formulation

De nombreuses recherches ont été réalisées pour connaître l'influence du E/C sur la vitesse de la carbonatation; citons Vénuat et Alexandre qui illustrent notamment que la progression de la carbonatation dans des bétons de ciment CEM I est facilitée quand de E/C augmente. Loo et al, ont étudié aussi l'influence de la teneur en ciment sur la carbonatation et ont établi que l'effet du dosage en ciment est insignifiant comparativement à celui du E/C [17].

D'un point de vue chimique, les additions minérales conduisent à des matériaux à faible teneur en portlandite. Il résulte d'une plus petite quantité de CO_2 nécessaire pour consommer toute la portlandite, de sorte que le pH chute plus facilement. D'un point de vue physique, il existe un autre effet, à savoir l'obtention d'une pâte de ciment hydraté moins connectée et éventuellement plus dense, ce qui abaisse le coefficient de diffusion du CO_2 .

I.3.3.7.2. Résistance mécanique à la compression

Il a souvent été considéré qu'il était possible de corrélérer la profondeur de carbonatation à la résistance mécanique à la compression du béton. Cette affirmation est une simplification grossière. En effet, l'approche selon laquelle durabilité et résistance sont liées positivement est discutable. Les changements de propriétés des ciments (la finesse et la teneur en C_3S plus élevées, l'utilisation d'additions minérales, etc.) et l'ajout d'adjuvants font que les nouveaux ciments peuvent obtenir la même résistance mécanique qu'auparavant avec un E/C plus élevé est une durabilité réduite d'un point de vue chimique [11].

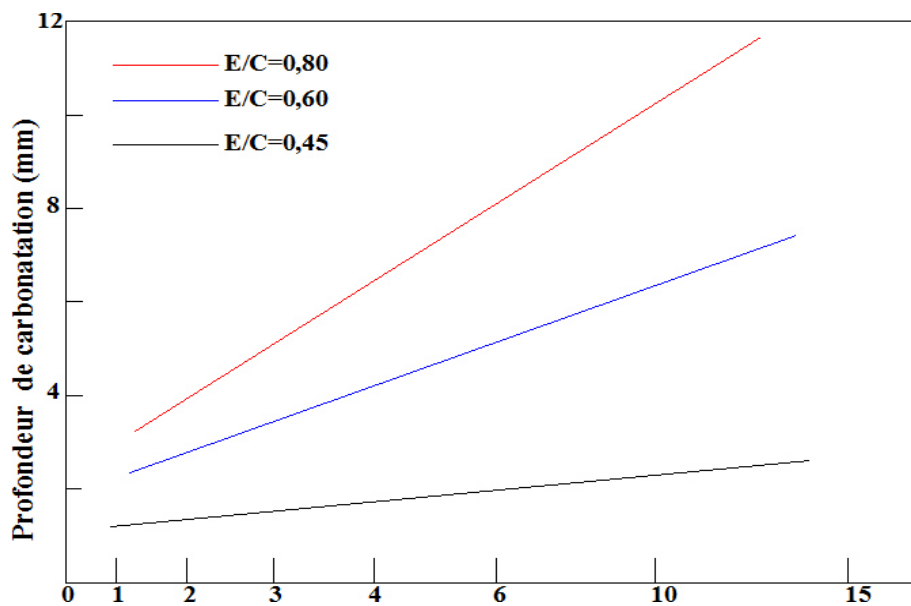


Figure I.14 : Profondeur carbonatée en fonction de la racine du temps [15]

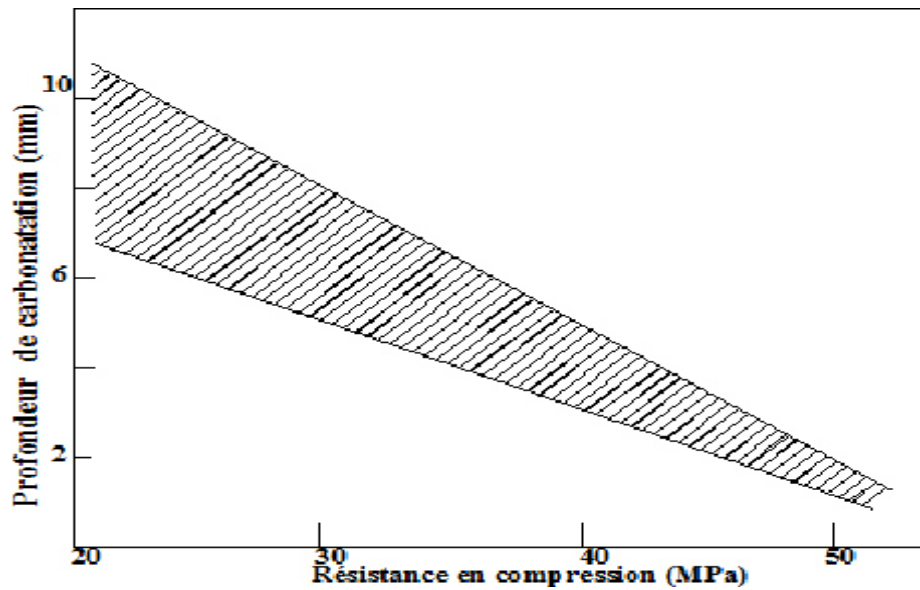


Figure I.15: Influence de la résistance en compression à 28 jours sur la profondeur carbonatée avec différents ciments et différentes expositions [15]

I.3.4. Pénétration des ions chlorures

Les sels de chlorures sont très solubles dans l'eau. Les ions ainsi formés dans l'eau pénètrent avec celle-ci dans le béton (pénétration des chlorures), soit par humidification d'un béton sec (convection), soit par diffusion, due au fait que la teneur en chlorure est plus forte dans le milieu environnant que dans le béton d'origine (gradient de concentration). Les chlorures venant de l'extérieur restent, en majorité, à l'état dissous dans la solution interstitielle du béton. Mais ils peuvent aussi réagir avec certains constituants du matériau (réaction chimique ou adsorption).

- Les chlorures agissent par rupture du film passif des aciers (processus encore imparfaitement compris) qui perd son caractère protecteur.
- Les chlorures sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier et le film passif est lui-même variable selon l'endroit.
- Les chlorures entraînent une corrosion qui est localisée (piqûres).

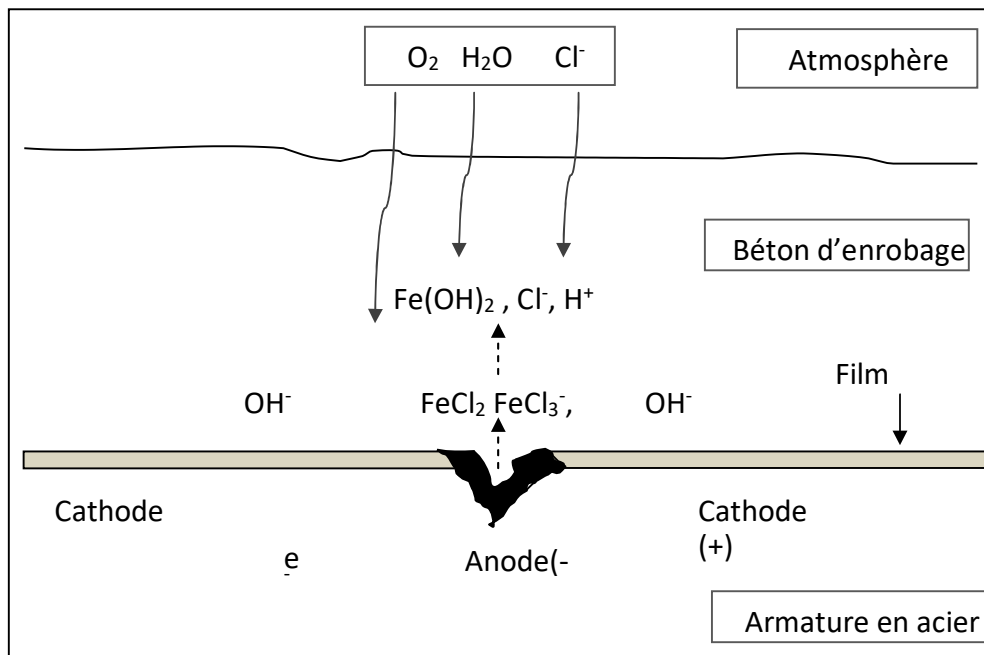


Figure I.16: Mécanisme de corrosion par des piqures due aux chlorures

I.3.5. Réaction sulfatique interne RSI (formation différée d'ettringite)

I.3.5.1. Généralité

Est une famille de réactions de dégradation endogènes des bétons. Ces réactions conduisent à la formation de cristaux d'ettringite provoquant gonflement et fissuration ainsi qu'une dégradation des propriétés mécaniques (résistance à la compression, module de Young).

Une quantité limitée de sulfates est toujours présente dans le béton car les sulfates font partie du ciment Portland. D'abord, ils sont présents dans le clinker et par la suite une quantité de sulfates de calcium est ajoutée au clinker lors de son broyage afin de régulariser la prise du C_3A . Cependant, la teneur en SO^3 dans le ciment est limitée à 2,3 % pour les ciments résistants aux sulfates (contenant moins que 5 % de C_3A), à 3,5 % pour le ciment Portland normal (ASTM Type I) et finalement à 4,5 % pour le ciment à résistance initiale élevée (ASTM Type III) qui contient plus que 8 % de C_3A .

Les sulfates de calcium ajoutés au clinker lors de son broyage réagissent avec le C_3A et l'eau pour former de l'ettringite dite ettringite primaire, qui assure donc la maniabilité du béton nécessaire à sa mise en place. Pour accélérer la progression des travaux ou la production dans la

préfabrication, un durcissement et une croissance des résistances mécaniques rapides sont souhaitées. La chaleur, que ce soit celle de l'hydratation elle-même ou d'une cure thermique, est un accélérateur puissant. Cependant, lorsque la température du béton dépasse un certain seuil, l'ettringite devient instable.

Les sources de sulfates pour la formation différée de l'ettringite sont donc ceux adsorbés sur les C-S-H, ceux qui se trouvent dissous dans la solution interstitielle et ceux qui rentrent dans la composition de monosulfoaluminates. Ces sulfates sont donc uniformément répartis dans la matrice du béton. La formation différée de l'ettringite se fait par conséquent uniformément dans la matrice durcie. L'expansion conséquente se produit lorsque l'espace pour la formation différée de l'ettringite est restreint. Cette expansion peut, dans certains cas, être contrôlée s'il y a suffisamment d'espace vacant dans la matrice sous forme de porosité élevée ou de bulles d'air entraîné [30]. La figure I.17 montre la diminution de l'expansion causée par la formation différée de l'ettringite avec l'augmentation du rapport E/C (augmentation de la porosité capillaire). Cette expansion a été déterminée sur des échantillons de mortier sans air entraîné, traités thermiquement à une température maximale de 90 °C. La figure I.18 montre la diminution de l'expansion des bétons avec l'augmentation du volume d'air entraîné.

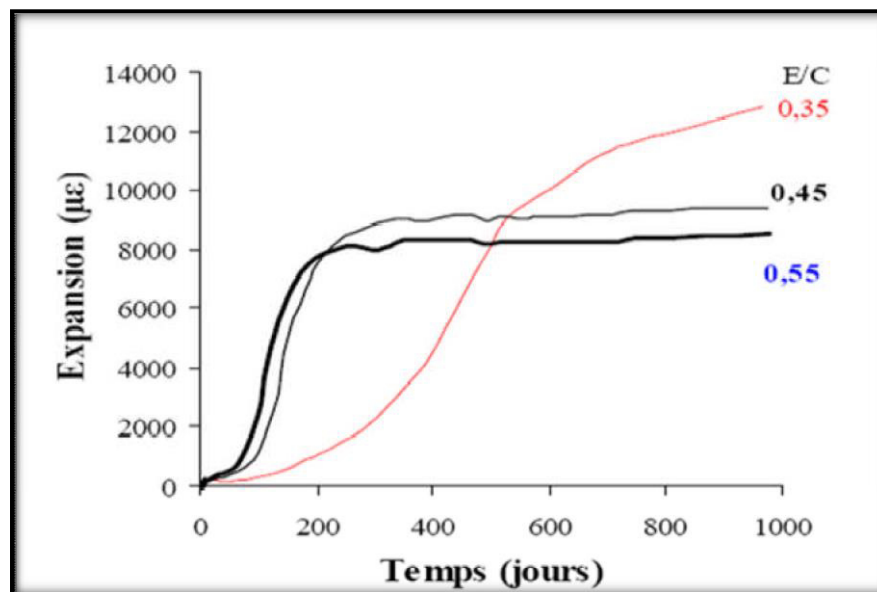


Figure I.17: Expansion des mortiers ayant différents rapports E/C (ciment Type III) [30].

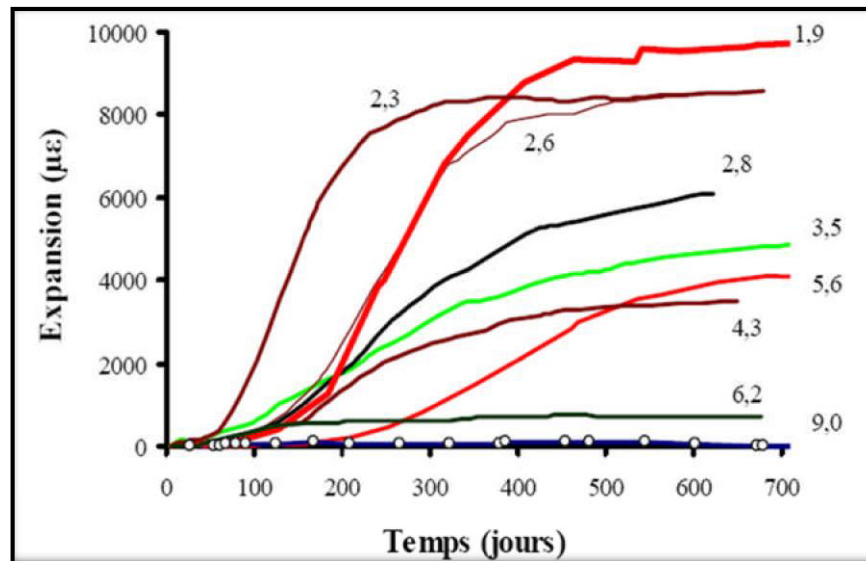


Figure I.18: Expansion dans le temps de bétons ayant différents volumes d'air occlus ou entraîné (rapport E/C 0,55; 300 kg de ciment par m³; ciment Type III) [30].

La formation différée de l'ettringite n'est pas réservée exclusivement aux bétons traités thermiquement, durant les premières heures, à une température élevée pour accélérer la prise et le durcissement. La formation différée de l'ettringite peut également apparaître dans les bétons subissant une température élevée causée par le dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment, durant les premières heures ou les quelques premiers jours suivant leur confection. Divet, [24], a démontré qu'une prolongation de la période durant laquelle la température du béton est élevée favorise la formation différée de l'ettringite. Cependant, la formation différée de l'ettringite dans les bétons dits « autochauffés » et surtout sa mise en cause dans l'expansion et la fissuration du béton in situ est souvent voilée par d'autres facteurs, tels que la réaction alcalis-granulats, le retrait, les cycles de gel-dégel... etc.

Des bétons fabriqués à partir de différents ciments commerciaux (3 différents ciments de résistance initiale élevée – Type III et un ciment ordinaire Canadien-Type 10) ayant un rapport E/C de 0,55, une teneur en ciment de 300 kg/m³ ont servi à confectionner des échantillons cubiques de 600 mm de côté. La température du béton frais était de 30 °C.

Le béton a été placé dans un coffrage isolé thermiquement (conditions quasi adiabatiques) pour simuler le développement de la température dans un élément de plus grande dimension. Une photo du cube expérimental est présentée dans la figure I.19



Figure I.19: Cube de 0,6m de côté dans de l'eau saturée en chaux [30].

Les courbes de développement de la température de ces 4 bétons sont présentées dans la figure I.20. Après sept jours passés dans le coffrage, les échantillons ont été démoulés et placés dans de l'eau saturée en chaux à la température du laboratoire. Les déformations linéaires au centre du cube ont été mesurées quotidiennement à l'aide d'extensomètres à cordes vibrantes. Le résultat de ces mesures est présenté, sous forme de courbes d'expansion en fonction du temps, dans la figure I.21.

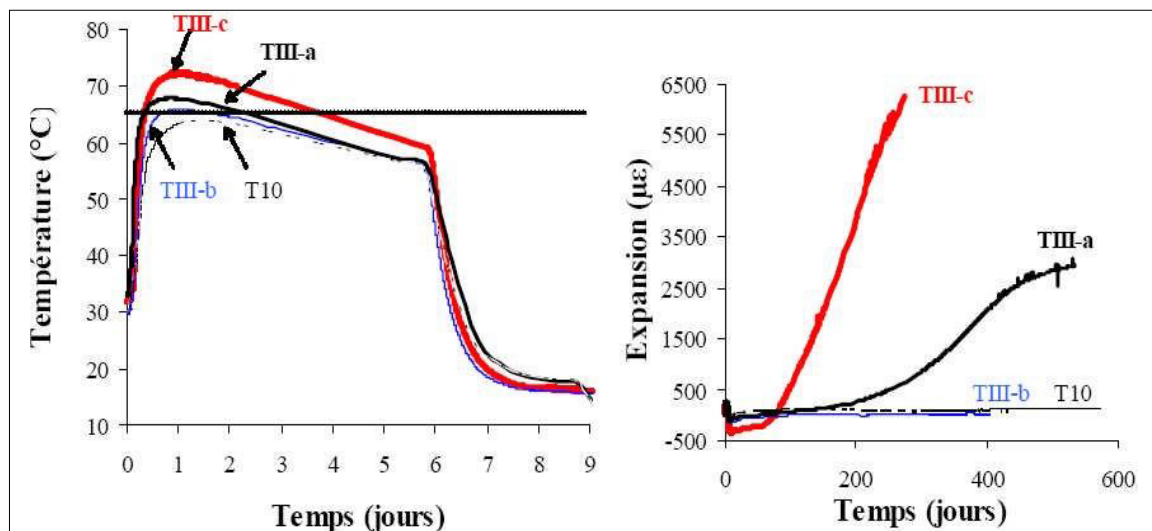


Figure I.20: Température des bétons « autochauffés » les 9 premiers jours [30].

Figure I.21: Expansion des bétons durant autochauffés dans le temps [30].

La température du béton fabriqué à partir du ciment TIII-a et de celui fabriqué à partir du ciment TIII-c est restée au-dessus de 65°C pendant 2 et 3,5 jours, respectivement, tandis que la température des bétons fabriqués avec les ciments TIII-b et T10 n'a pas dépassé la limite de 65 °C. Après seulement 100 jours, le béton TIII-c a commencé à prendre de l'expansion de manière significative . Dans le cas du béton TIII-a, il a fallu 200 jours pour qu'une expansion significative se produise. Les bétons TIII-b et T10, pour lesquels la température n'a pas dépassé 65 °C n'ont pas montré d'expansion significative durant les 600 jours de temps d'expérimentation.

Une analyse de la microstructure du béton TIII-c, effectuée après 400 jours, a clairement démontré l'existence d'ettringite dense et mal cristallisée dans les interfaces entre les granulats et la pâte, tel que présenté dans le micrographe de la figure I.22. Cette expérience prouve que la température élevée du béton développée par l'hydratation du ciment peut causer la formation différée de l'ettringite et l'expansion conséquente.

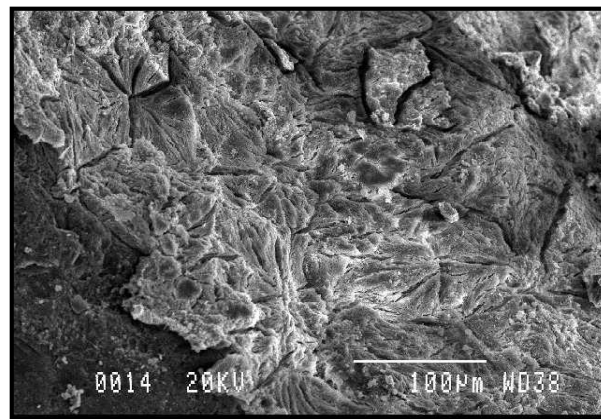


Figure I.22: Micrographie de l'ettringite massive, mal cristallisée dans l'interface entre le granulats et la pâte; cube TIII-c après 400 jours [31]

I.3.6. Les réactions l'alcali

C'est vers 1942, aux Etats-Unis que les réactions alcali-granulats furent découvertes comme la source principale de dégradation d'un barrage, ces réactions chimiques produisent dans le béton des gonflements qui sont capable dans le cas échéant, de fissurer la structure. Les aspects visibles de ces réactions physico-chimiques sont des fissurations sous forme de faïençage, des colorations le long des fissures, des exsudations de gel ou encore des éclatements de béton, (figure I.23).

Outre ces aspects visibles, on note également des pertes de résistances mécaniques importantes (jusqu'à 80% en traction et 60% en compression) et de rigidité (de 60 à 80% de chute de module d'élasticité) [26] [25].



Figure I.23: Fissuration en étoile de plusieurs millimètres d'ouverture du la réaction alcali-granulat [27].

On distingue trois types de réactions alcali-granulats [29], (l'alcali - réaction)

- Les réactions alcali-silice.
- Les réactions alcali-silicate.
- Les réactions alcali-carbonate.

Les réactions alcali-silice et les réactions alcali-silicate sont assez semblables; elles diffèrent principalement par leurs vitesses: les réactions alcali-silice sont plus rapides. Les trois types de réactions ont en commun la réaction de la solution interstitielle d'un béton avec certains granulats, laquelle engendre des gonflements qui peuvent entraîner des fissures.

Dans ce qui suit, on entend par réactions alcali-granulats aussi bien les réactions alcali-silice que les réactions alcali-silicate; il ne sera traité que ponctuellement des réactions alcali-carbonate, rarement observés [28].

I.3.6.1. Facteurs d'influence pour les réactions alcali-granulats

De nombreux facteurs exercent de manière très diverse une influence sur les réactions alcali-granulat. C'est pourquoi on ne connaît pas de solutions universellement applicables pour les éviter.

Les conditions environnantes sont déterminantes pour que des réactions alcalis-granulat se produisent. Elles sont en outre importantes:

- La teneur en granulats réactifs ainsi que le type et la taille de ces granulats.
- La teneur en alcalins du béton et la composition de la solution interstitielle.
- Les propriétés du béton.

I.3.7. Les autres causes de dégradation des bétons

Nous avons vu que les bétons se dégradent à cause des milieux dans lesquels ils sont placés car ils y subissent des agressions physiques et chimiques. Certaines causes, essentiellement dues à une mauvaise mise en œuvre, peuvent également participer à la dégradation des bétons.

❖ Désordres sur ragréage

Lors du décoffrage, il arrive que des défauts apparaissent (ségrégation, enrobage insuffisant). Dans ce cas on met souvent en place un ragréage. Des comportements différentiels entre ce dernier et le béton sont possibles, ce qui induit l'apparition de fissures. Il y a alors pénétration d'humidité, corrosion des armatures et décollements.

❖ Reprises de bétonnage

Les reprises de bétonnage médiocres (non traitées ou avec ségrégation) font l'objet de désordres induits par une qualité amoindrie du béton. Il peut alors y avoir corrosion des armatures et décollements de béton.

❖ Enrobage

Un enrobage insuffisant ne permet pas au béton de protéger les armatures de par son caractère basique, Il y a donc un risque plus élevé de corrosion des armatures

❖ Mauvaise qualité des bétons employés

Un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux: nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.

Le tableau I.11 fait le bilan des principales causes d'endommagement du béton et leurs symptômes.

Causes	Symptômes							
	Défauts de construction	Fissuration	Désintégration	Distorsion ou Mouvement	Erosion	Scellant au joint	Suintement	Eclatement
Dégâts accidentels		×						×
Actions Chimiques		×	×				×	
Erreurs de construction	×	×				×	×	×
Erreurs de conception		×				×	×	×
Corrosion		×						×
Erosion			×		×			
Gel		×	×					×
Distorsion ou Mouvement		×		×		×		×
Retrait	×	×		×				
Changement de Température		×				×		×

Tab I.7 : Les causes d'endommagement du béton et leurs symptômes

I. 4. La durabilité et durée de vie d'un ouvrage

I.4.1. La durabilité des structures en BA

Il est essentiel qu'une structure en béton armé puisse conserver sa résistance sans que sa gestion technique ou sa fonction soit modifiée de façon significative, afin de ne pas compromettre sa durabilité. Il convient de rappeler que la durabilité n'est pas la garantie d'une durée de vie infinie à la structure, mais un objectif de qualité orientant aussi bien la conception de l'ouvrage que celle du matériau.

Cette réflexion permet l'identification de deux concepts distincts vis-à-vis de la durabilité: celle du matériau et celle de la structure.

- La durabilité du matériau se vérifie à partir de sa capacité de conserver ses caractéristiques et son intégrité pendant la durée de vie prévue pour la structure.
- La durabilité de la structure dépend de celle du matériau ; cependant elle ne se résume pas exclusivement à la qualité du matériau employé. C'est pourquoi la durabilité de la structure (complète ou d'un élément,) consiste dans l'accomplissement de ses performances de sécurité structurale (respect à un ELU) et d'aptitude au service (respect à un ELS) dans des conditions prévues d'utilisation [4] [5] [23].

I.4.2. Définition de la durée de la vie d'un ouvrage

De laquelle l'ensemble des endommagements cumulés subis au cours du temps ne dépasse pas un niveau critique ou, en d'autres termes, un ou plusieurs états limites donnés. La durée de vie peut être prise égale à la durée de service sans précaution initiale particulière, sans entretien spécialisé et sans réparation importante du gros œuvre ou de la structure [6]. Cela correspond à un fonctionnement normal et à une maintenance courante pour un niveau de service donné qui peut également faire intervenir des considérations d'esthétique [7] [31] [32].

I.4.3. La durabilité des bétons dans la norme NF EN 206-1

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure de la norme et une des raisons de son évolution. Les environnements sont redéfinis et pour chacun de ces environnements ou « expositions », l'obligation de moyens et l'obligation de résultats sont présentés comme deux alternatives (NF EN 206-1) [34]. Autrement dit, les exigences relatives aux performances du béton ne se superposent pas à celles relatives à sa composition, mais peuvent les remplacer, pour une même durabilité visée [3] [33].

I.4.3.1. Les classes d'exposition

Une des principales évolutions de la norme est la définition de classes d'exposition. Chaque ensemble de classes est défini en fonction de l'origine du risque:

- ✓ X0: absence de risque de corrosion ou d'attaque.
- ✓ XC: risque de corrosion par carbonatation.
- ✓ XD: risque de corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer.
- ✓ XS: risque de corrosion par les chlorures de l'eau de mer.
- ✓ XF: attaque par le gel-dégel.
- ✓ XA: attaques d'origines chimiques.

Pour chaque ensemble, les classes sont définies par des indices, selon des niveaux de risque croissants. Selon ces définitions des classes, un environnement donné peut correspondre à plusieurs classes d'exposition, par exemple XC (carbonatation) et XD (chlorures issus de sels de déverglaçage). A l'inverse, une même classe d'exposition peut correspondre à plusieurs actions environnementales et mécanismes de dégradation [35].

I.4.4. Les indicateurs de durabilité

L'application de la démarche performantielle en phase de conception nécessite, en premier temps, un recensement des indicateurs de durabilité. Ces derniers sont choisis en fonction de leur importance vis-à-vis de la durabilité, des caractéristiques de l'ouvrage et de son environnement et des choix des dispositions constructives (enrobage ,...). Se sont des paramètres simples mais pertinents pour quantifier les phénomènes et pour élaborer les outils prédictifs [5] [8] [35].

I.4.4.1. Indicateurs de durabilité généraux

Les indicateurs de durabilité généraux, cités ci-après sont des paramètres de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. Ils sont indispensables pour la prévention vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali réaction. Ces indicateurs sont les suivants:

- Porosité accessible à l'eau,
- Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorures,
- Perméabilité à l'eau liquide et au gaz,
- Teneur en portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

I.4.4.2. Indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction

Les indicateurs de durabilité généraux sont complétés le plus souvent par des indicateurs spécifiques au processus de dégradation auquel l'ouvrage sera exposé. Dans le cas de la prévention des dégradations dues à l'alcali-réaction, les indicateurs spécifiques retenus sont classés en deux catégories qui sont les suivants:

- Indicateurs chimiques (constituants du béton) :
 - Quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps (cinétique) ;
 - Bilan des alcalins équivalents ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{éq.}}$) actifs de la solution interstitielle ;
- Indicateur global et macroscopique (béton durci): Expansion d'éprouvette en béton.

I.4.4.3. Indicateurs de durabilité spécifiques à l'attaque sulfatique

Les indicateurs de durabilité spécifiques à l'attaque sulfatique sont en cours d'établissement. Plusieurs programmes de recherche sont en cours. Ils seront

probablement de deux types différent [8]:

- Indicateurs chimiques (constituants du béton) :
 - Bilan des sulfates équivalents ;
 - Nature des hydrates,
- Indicateur global et macroscopique (béton durci): Stabilité dimensionnelle des éprouvettes de béton.

I.4.5. Spécifications relatives aux indicateurs de durabilité [2]

Les spécifications performantielles sont fondées sur les indicateurs de durabilité généraux, les classes (définies dans l'annexe) et le type d'environnement.

Les spécifications types, vis-à-vis de la prévention de la corrosion des armatures et l'alcaliréaction, en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée, sont proposées dans le tableau 1 (voir annexe).

I.4.5.1. Types d'environnement

Les différents environnements ont été définis à partir des classes d'exposition figurant dans la norme Européenne EN 206-1 relatives au béton, mais seuls les environnements influençant la corrosion des armatures, l'alcali-réaction et l'attaque sulfatique sont considérés. Ces environnements sont récapitulés dans les tableaux 2, 3 et 4 figurant sur l'annexe [37].

I.4.5.2. Spécifications types pour la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures

Pour chaque durée de vie exigée et pour chaque type d'environnement considéré, un certain nombre d'indicateurs doivent être quantifiés et différents critères de conformité doivent être vérifiés. Le nombre des indicateurs choisis varie de 1 à 4 selon le cas considéré. Quand le niveau d'exigence et l'agressivité du milieu environnant augmentent, le nombre d'indicateur de durabilité à quantifier croît également et les critères de conformité (seuils) deviennent plus sévères (tableau 5 en annexe).

Les indicateurs de durabilité généraux proposés peuvent être remplacés par des indicateurs de substitution. Ces modifications doivent être réalisées sous réserve de justification et/ou de validation préalables, et en se basant sur les classes et les valeurs

limites indiquées aux tableaux 6 et 7 en annexe ou dans d'autre système de classement disponibles [36].

I.4.5.3. Spécifications types pour la durabilité vis-à-vis de l'alcali réaction

La quantification des indicateurs de durabilité spécifiques à l'alcali-réaction a pour objectif de faire la prédiction lors de la phase de conception ou pendant l'expertise d'un ouvrage existant pour se prononcer sur sa durabilité résiduelle.

La démarche préventive repose sur la détermination du niveau de prévention en fonction de la catégorie de l'ouvrage et de l'environnement auquel l'ouvrage est exposé.

Il est à signaler que plus le niveau de prévention sera élevé plus la durée de vie exigée sera augmentée (tableau 8 en annexe).

I.5. Conclusion

Les structures et ouvrages en béton armé sont soumis, dès leur plus jeune âge, à des contraintes d'ordre mécanique ou environnementales. Leur comportement vis-à-vis de la durabilité est essentiellement lié au comportement particulier du matériau béton. En effet, celui-ci réagit sans cesse avec l'environnement.

La durée de vie est alors devenue à la fois une exigence et un souci, il convient de l'assurer par une conception et une mise en œuvre adéquates, de la quantifier, de la restaurer ou de la prolonger. Les maîtres d'ouvrages ont donc le souci de connaître l'état du patrimoine existant afin de s'assurer de sa stabilité dans le temps, tout en étudiant les désordres qui peuvent survenir essentiellement des phénomènes de corrosion des armatures afin de mieux maintenir, diagnostiquer et réparer ces désordres.

Chapitre II: La norme NF EN 206-1

II.1. Introduction

La présente norme européenne s'applique au béton destiné aux structures coulées en place, aux structures préfabriquées, aux éléments de structure préfabriqués pour bâtiments et structures de génie civil. Le béton peut être du béton fabriqué sur chantier, du béton prêt à l'emploi ou du béton fabriqué dans une usine de production de produits préfabriqués. La présente norme 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. La présente norme européenne s'applique uniquement aux bétons compactés de telle manière que la quantité d'air occlus autre que l'air entraîné soit négligeable. La présente norme s'applique au béton de masse volumique normale, au béton lourd et au béton léger. D'autres normes européennes relatives à des produits spécifiques, par exemple des produits préfabriqués, ou à des procédés entrant dans le domaine d'application de la présente norme, peuvent nécessiter ou autoriser des dérogations par rapport à la présente norme [38].

II.2. Contexte de la norme NF EN 206-1

La norme NF EN 206-1 est l'aboutissement de 20 ans de travail de normalisation européenne réalisé par le TC 104 du Comité Européen de Normalisation (CEN). Après la publication en 1990 de la prénorme européenne ENV 206, les pays membres ont publié des normes nationales s'inspirant de cette prénorme européenne expérimentale, ce fut le cas en France avec la norme XP P18-305 [40].

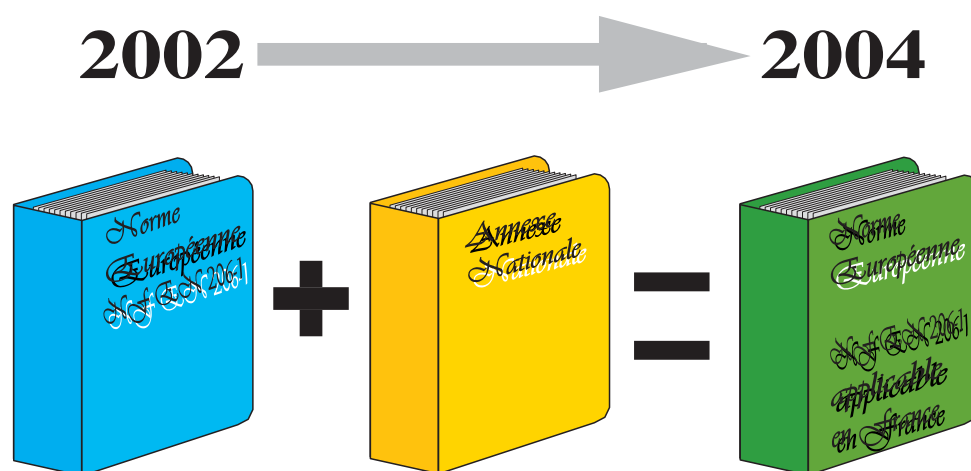


Figure II.1 : Évolution de la norme NF EN 206-1

Elle s'inscrit dans un contexte normatif global qui comprend :

- **Des normes de constituants** : granulats pour béton (NF EN 12620 et XP P 18-545), ciments courants (NF EN 197-1), adjuvants pour béton (NF EN 934-2) et eau de gâchage (NF EN 1008).
- **Des normes d'essais** (séries NF EN 12350 et NF EN 12390).
- **Des normes de dimensionnement** (Eurocodes) en particulier la série des normes NF EN 1992 ou Eurocode béton (EC 2).

II.3. Présentation généralité de la norme NF EN 206-1

II.3.1. Généralités

La norme NF EN 206/CN concerne :

- Les bétons prêts à l'emploi.
- Les bétons fabriqués sur chantier.
- Les bétons produits dans une usine de fabrication de produits préfabriqués.

Destinés :

- ❖ Aux bâtiments,
- ❖ Aux ouvrages de génie civil.

Elle couvre les spécifications, la production, la livraison et le contrôle de conformité des bétons et a pour objectif de faciliter la commande et l'utilisation du béton au sein de l'union européenne.

Elle impose au prescripteur du béton de définir les risques d'agressions et d'attaques auxquels le béton de l'ouvrage ou de chaque partie d'ouvrage va être exposé pendant la durée d'utilisation de la structure et donc de prescrire le béton parfaitement adapté. Elle s'applique lorsque le lieu d'utilisation du béton est la France.

Elle est composée de la norme européenne EN 206 de l'Annexe Nationale Française et de son Complément National, indispensables pour son utilisation, qui spécifient les dispositions complémentaires à respecter en France pour tenir compte des spécificités climatiques et des techniques de construction.

Elle prend donc en compte les expériences européennes, tout en conservant les acquis en matière de connaissance et d'expertise française du matériau béton au travers de son Complément National.

La norme NF EN 206/CN spécifie les exigences applicables :

- Aux constituants béton .
- Aux propriétés du béton frais et durci, et à leur vérification.
- Aux limitations imposées à la composition du béton.
- A la spécification du béton.
- A la livraison du béton frais.
- Aux procédures de contrôle de production.
- Aux critères de conformité et à l'évaluation de la conformité.

Elle s'applique (avec son Annexe Nationale et son Complément National) lorsque le lieu d'utilisation du béton est en France

Nota : La Norme introduit le béton d'ingénierie : béton destiné à un ouvrage donné, ou un ensemble d'ouvrages d'un projet donné, dont la formulation résulte d'une étude préliminaire, réalisée sous la responsabilité du prescripteur avant le début de l'opération de construction, considérée et acceptée par le producteur et l'utilisateur du béton.

Si le béton est conforme aux valeurs limites spécifiées de la norme NF EN 206/CN, il est présumé satisfaire aux exigences de durabilité pour l'utilisation prévue dans les conditions environnementales spécifiques, dans la mesure où :

- Les classes d'exposition ont été correctement sélectionnées.
- L'épaisseur du béton d'enrobage est conforme à l'Eurocode Béton (EC2).
- Le béton est correctement mis en place, vibré et soumis à une cure adaptée.
- La maintenance appropriée est réalisée au cours de la durée d'utilisation de l'ouvrage.

La norme prend en compte la notion de durabilité en s'appuyant sur la notion de classe d'exposition.

Elle permet, par une combinaison de classes d'exposition, de définir avec précision l'environnement de chaque partie d'ouvrage. Elle spécifie, en termes de composition et de performance, des formules de béton adaptées pour chaque classe d'exposition, elle fournit les critères de conformité et les règles pour l'évaluation de la conformité [38].

II.3.2. Domaine d'application

La norme NF EN 206-1 s'applique aux bétons de structure qu'ils soient des bétons prêts à l'emploi ou des bétons réalisés sur chantier (par l'utilisateur du béton), destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil.

Pour les produits préfabriqués structuraux en béton, autres que les blocs, les normes européennes harmonisées s'appuient sur la norme NF EN 13369, laquelle précise et complète, pour les aspects concernant les produits préfabriqués structuraux, la norme NF EN 206-1 [39].

Pour les autres produits préfabriqués, dont les blocs, il existe des normes qui contiennent en elles-mêmes toutes les spécifications nécessaires.

En ce qui concerne le Béton Prêt à l'Emploi, la norme NF EN 206-1 s'applique également aux bétons lourds et à certains bétons légers, mais ne couvre pas :

- Les bétons non-structuraux (bétons de remplissage, bétons de tranchées, bétons de calage de bordures de trottoir, bétons de propreté...).
- Les bétons aérés.
- Les bétons mousses.
- Les bétons poreux (caverneux).
- Les bétons très légers (masse volumique $< 800 \text{ kg / m}^3$).
- Les bétons réfractaires.
- Les bétons de granulats non minéraux.

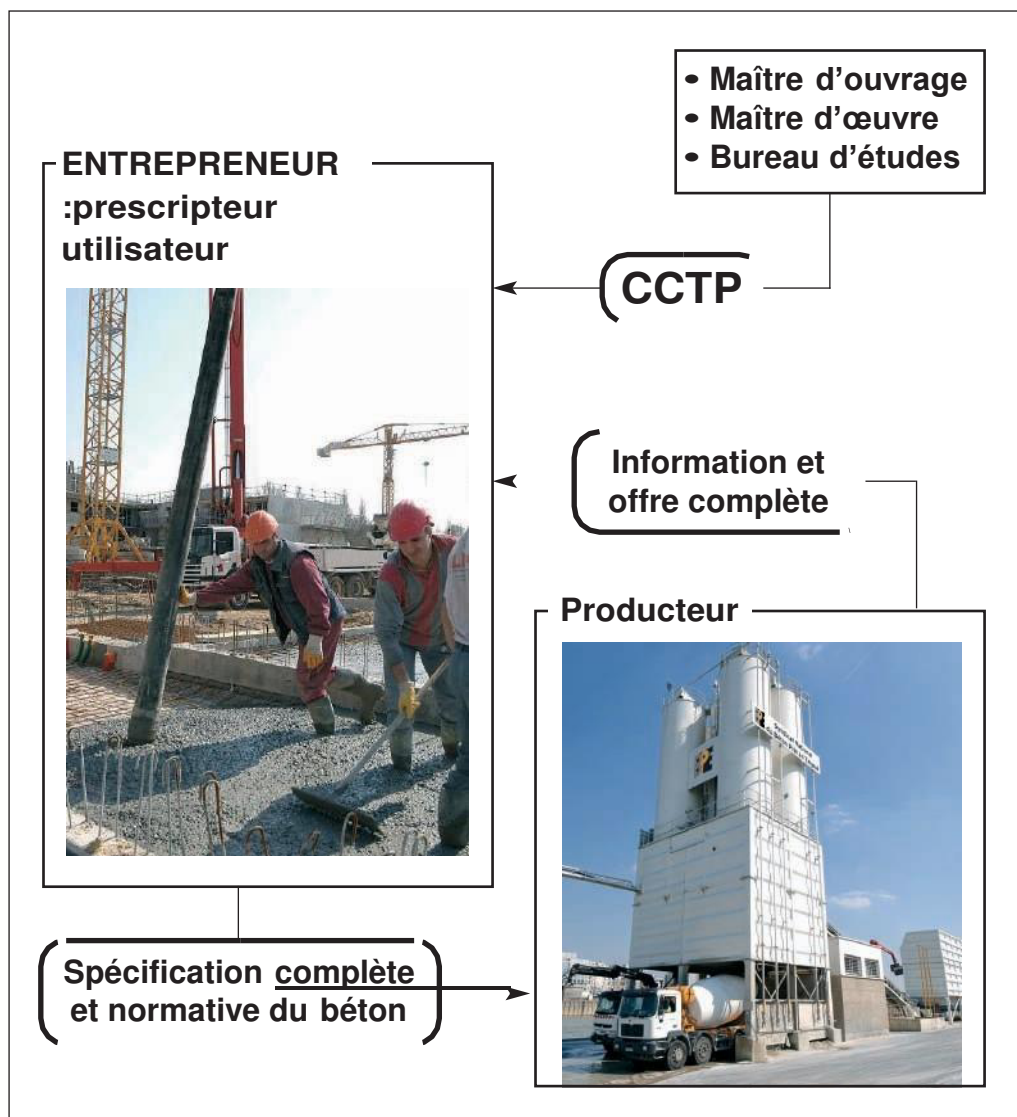
II.3.3. Évolutions de la norme

II.3.3.1. Clarification des responsabilités des différents intervenants

La norme NF EN 206-1 précise le rôle de chaque intervenant : le prescripteur, le producteur et l'utilisateur du béton. Ainsi :

- ❖ **Le prescripteur** est responsable de la spécification du béton. Il doit s'assurer de prendre bien en compte tous les paramètres pour définir parfaitement le béton à utiliser.
- ❖ **Le producteur** est responsable de la conformité et du contrôle de production du béton.
- ❖ **L'utilisateur** est responsable de la mise en place du béton dans la structure.

Dans le cas du BPE, l'acheteur du béton frais doit fournir au producteur, à chaque commande, toutes les spécifications normatives du béton.

Figure II.2 : Relations entre les divers intervenants [40].

II.3.3.2. Désignation des bétons

La norme NF EN 206-1 décline de trois types de bétons prêt à l'emploi ou réalisé sur chantier [39].

- Les Bétons à Propriétés Spécifiées : BPS
- Les Bétons à Composition Prescrite : BCP
- Les Bétons à Composition Prescrite dans une Norme : BCPN

II.3.3.2.1. Les Béton à Propriétés Spécifiées (BPS) [39]

Il s'agit de béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur qui est responsable de fournir un

béton satisfaisant à ces exigences.

Les spécifications de base sont les suivantes :

- La conformité à la norme NF EN 206-1.
- La classe de résistance à la compression.
- La classe d'exposition.
- La classe de consistance.
- La classe de teneur en chlorures.
- La dimension nominale maximale des granulats.

Des caractéristiques complémentaires (type de ciment...) peuvent, le cas échéant, être demandées en plus des spécifications de base, avec des niveaux de performances contrôlées suivant des méthodes d'essais définies.



Figure II.3 : Les BPS sont les bétons principalement fabriqués et commercialisé par les centrales de BPE

II.3.3.2.2. Les Bétons à Composition Prescrite (BCP)

Béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur qui est responsable de fournir un béton respectant cette composition [39].

II.3.3.2.3. Les Bétons à Composition Prescrite dans une Norme (BCPN) [39]

Béton dont la composition est définie dans une norme applicable là ou le béton est utilisé.

II.3.3.3. Classes d'expositions des bétons

La norme NF EN 206/CN définit 18 classes d'exposition regroupées en 6 « familles » par risque de corrosion, d'attaques ou d'agressions dépendant des actions et conditions environnementales auxquelles le béton de l'ouvrage ou de chaque partie d'ouvrage est soumis pendant leur durée d'utilisation.

Le choix de la classe d'exposition est de la responsabilité du maître d'ouvrage.

À chacune des classes correspondent des spécifications sur la composition des bétons, sous forme de valeurs limites à respecter [39].

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.

La combinaison des 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.

II.3.3.4. Spécification du béton

Pour la spécification du béton, le prescripteur doit prendre en compte :

- L'utilisation du béton frais et durci.
- Les conditions de cure.
- Les dimensions de la structure (développement de chaleur).
- Les agressions environnementales auxquelles la structure sera exposée.
- La durée d'utilisation prévue du projet.
- Toutes exigences sur les granulats apparents ou la finition des surfaces.

II.3.3.4.1. Spécification des Bétons à Propriétés Spécifiées (BPS)

- ❖ La spécification doit comprendre
 - Exigence de conformité à la norme NF EN 206/CN
 - Classe de résistance en compression
 - Classes d'exposition (avec la lettre F entre parenthèses)
 - Dimension maximale nominale des granulats
 - Classe de teneur en chlorure.
 - Classe de consistance.
- ❖ Exigences complémentaires éventuelles.
 - Types ou classes particulières de ciments.
 - Types ou classes particulières de granulats (alcali-réaction...).
 - Résistance à la traction par fendage.
 - Teneur en air (résistance au gel/dégel).

II.3.3.4.2. Spécification des Bétons à Composition Prescrite (BCP)

- ❖ La spécification doit comprendre.
 - Exigence de conformité à la norme NF EN 206/CN
 - Dosage en ciment.
 - Type de ciment et classe de résistance.
 - Rapport Eau/Ciment ou consistance.
 - Type, catégorie et teneur maximale en chlorures des granulats.
 - Type et quantité des adjuvants ou additions.

- Dimension maximale nominale des Granulats.
- ❖ Exigences complémentaires éventuelles.
 - Origine des constituants du béton.
 - Exigences complémentaires sur les granulats ...

II.3.3.5. Exigences relatives au béton et méthodes de vérification

II.3.3.5.1 Exigences de base relatives aux constituants

Les constituants ne doivent pas contenir de substances nocives en quantités telles qu'elles puissent avoir un effet préjudiciable sur la durabilité du béton ou induire une corrosion des armatures, ils doivent être aptes à l'emploi pour l'utilisation envisagée du béton.

Lorsque l'aptitude générale à l'emploi d'un constituant est établie, cela ne signifie pas qu'il puisse être utilisé dans tous les cas ou quelle que soit la composition du béton.

Seuls les constituants dont l'aptitude à l'emploi pour l'utilisation prescrite est établie doivent être utilisés dans les bétons conformes à l'EN 206-1 [38].

- Par un agrément technique européen faisant spécifiquement référence à l'utilisation du constituant dans du béton conforme à l'EN 206-1 ;
 - Par des normes nationales correspondantes ou des dispositions en vigueur là où le béton est utilisé, faisant spécifiquement référence à l'utilisation du constituant dans du béton conforme à l'EN 206-1.
- **Ciment [38]**

L'aptitude générale à l'emploi est établie pour les ciments conformes l'EN 197-1.
 - **Granulats [38]**

L'aptitude générale à l'emploi est établie pour :

 - Les granulats de masse volumique normale et les granulats lourds conformes au pr EN 12620:2000 ;
 - Les granulats légers conformes au pr EN 13055-1:1997.

II.3.3.5.2. Exigences de base pour la composition du béton

La composition du béton et les constituants des bétons à propriétés spécifiées ou à composition prescrite doivent être choisis de manière à satisfaire aux exigences spécifiées pour le béton frais et durci, y compris la consistance, la masse volumique, la résistance, la durabilité, la protection contre la corrosion des pièces en acier noyées, tout en tenant compte du procédé de production et de la méthode choisie pour l'exécution des ouvrages en béton.

Lorsque ce n'est pas précisé dans la spécification, le producteur doit sélectionner les types et les classes de constituants parmi ceux dont l'aptitude à l'emploi est établie pour les conditions d'environnement spécifiées [38].

Pour les bétons à composition prescrite dans une norme, la composition est limitée à :

- Des granulats naturels de masse volumique normale.
- Des additions en poudre à condition qu'elles ne soient pas prise en compte pour calculer le dosage en ciment et le rapport eau/ciment.
- Des adjuvants, à l'exception des entraîneurs d'air.
- Des compositions remplissant les critères des tests initiaux décrits.

II.3.3.6. Exigences spécifiées par la norme NF EN 206-1

La norme NF EN 206/CN spécifie les exigences applicables [38]:

- ✓ Aux constituants du béton.
- ✓ Aux propriétés du béton frais et durci et à leur vérification.
- ✓ Aux limitations imposées à la composition du béton.
- ✓ A la spécification du béton.
- ✓ A la livraison du béton frais.
- ✓ Aux procédures de contrôle de production.

II.3.3.7. Exigences liées aux classes d'expositions

La résistance du béton aux diverses conditions environnementales auxquelles il est soumis pendant la durée d'utilisation prévue de la structure impose le respect d'exigences précises.

Ces exigences propres à chaque classe d'exposition doivent être spécifiées en termes de :

- ✓ Type et classe de constituants permis.

- ✓ Rapport maximal eau / ciment.
- ✓ Dosage minimal en liant équivalent (ou absorption d'eau maximale dans les cas des produits structuraux préfabriqués).
- ✓ Résistance minimale à la compression du béton.

Et dans certains cas teneur minimale en air du béton ou résistance à des essais de gel-dégel [38]:

II.4. Tâches et responsabilité des acteurs

La norme NF EN 206-1 distingue les notions de prescripteur, de producteur du béton et d'utilisateur. Elle définit et donc clarifie les tâches et les responsabilités de chaque acteur [38].

- **Le prescripteur**

Personne physique ou morale qui établit la spécification du béton frais et durci, le prescripteur est responsable de la spécification du béton et du choix de la classe d'exposition [38].

Le prescripteur du béton doit prescrire toutes les exigences pertinentes nécessaires à l'obtention des propriétés du béton, à sa mise en place, à la cure ou à tout autre traitement ultérieur ou pour obtenir un aspect esthétique. Il doit prendre en compte : l'utilisation du béton frais et durci, les conditions de cure, les agressions environnementales auxquelles la structure sera exposée, toutes les exigences sur les granulats apparents ou la finition des surfaces, toutes les exigences liées aux enrobages.

- **Le producteur**

Personne physique ou morale qui produit le béton frais, le producteur est responsable de la conformité et du contrôle de production.

- **L'utilisateur**

Personne physique ou morale qui utilise le béton frais pour l'exécution d'un ouvrage, l'utilisateur est responsable de la mise en œuvre du béton dans l'ouvrage.

II.5. Classification des bétons

La norme NF EN 206-1 définit des spécifications sur les bétons à l'état frais et à l'état durci.

II.5.1. Classe de consistance du béton frais

La norme NF EN 206-1 définit pour les bétons à teneur en eau courante, cinq classes de consistance des bétons.

<i>Classes de consistance des bétons</i>					
<i>Classe</i>	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	<i>S5</i>
<i>Affaissement (en mm)</i>	<i>10 à 40</i>	<i>50 à 90</i>	<i>100 à 150</i>	<i>160 à 210</i>	<i>≥ 220</i>

Tab II.1 : Classes de consistance des bétons

La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams.

La consistance peut aussi être spécifiée par :

- Le temps VEBE (en secondes) : 5 classes VEBE.
- L'indice de serrage : 4 classes de serrage.
- Le diamètre d'étalement (en mm) : 6 classes d'étalement.

II.5.2. Classes de résistance à la compression des bétons durcis

La résistance des bétons durcis à 28 jours peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques, elle peut donc être définie par les deux valeurs suivantes.

- **f_{ck-cyl}**: résistance caractéristique (fractile 5 %) en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cylindriques (trois dimensions sont retenues : $\varnothing = 150 \text{ mm} - H = 300 \text{ mm}$.
 $\varnothing = 160 \text{ mm} - H = 320 \text{ mm}$.
 $\varnothing = 110 \text{ mm} - H = 220 \text{ mm}$.
- **f_{ck-cube}**: résistance caractéristique (fractile 5 %) en compression du béton déterminée par essais sur éprouvettes cubiques (côté : 100 ou 150 mm).

La norme NF EN 206-1 propose deux familles de classes de résistance en fonction de la masse volumique du béton, qui correspondent à la résistance caractéristique que doit atteindre le béton à 28 jours:

- La classe de résistance à la compression des bétons de masse volumique normale et des bétons lourds est désignée par la lettre C suivie des valeurs f_{ck-cyl} et $f_{ck-cube}$;
- La classe de résistance des bétons légers est désignée par les lettres LC suivies des valeurs f_{ck-cyl} et $f_{ck-cube}$.

<i>Classe de résistance à la compression pour les B masse volumique normale et les bétons lourds</i>		
<i>Classe</i>	<i>f_{ck-cyl} (en N/mm^2)</i>	<i>$f_{ck-cube}$ (en N/mm^2)</i>
<i>C 8/10</i>	<i>8</i>	<i>10</i>
<i>C 12/15</i>	<i>12</i>	<i>15</i>
<i>C 16/20</i>	<i>16</i>	<i>20</i>
<i>C 20/25</i>	<i>20</i>	<i>25</i>
<i>C 25/30</i>	<i>25</i>	<i>30</i>
<i>C 30/37</i>	<i>30</i>	<i>37</i>
<i>C 35/45</i>	<i>35</i>	<i>45</i>
<i>C 40/50</i>	<i>40</i>	<i>50</i>
<i>C 45/55</i>	<i>45</i>	<i>55</i>
<i>C 50/60</i>	<i>50</i>	<i>60</i>
<i>C 55/67</i>	<i>55</i>	<i>67</i>
<i>C 60/75</i>	<i>60</i>	<i>75</i>
<i>C 70/85</i>	<i>70</i>	<i>85</i>
<i>C 80/95</i>	<i>80</i>	<i>95</i>
<i>C 90/105</i>	<i>90</i>	<i>105</i>
<i>C 100/115</i>	<i>100</i>	<i>115</i>

Tab II.2 : Classe de résistance à la compression pour les bétons masse vobétons lourds

<i>Classes de résistance à la compression pour les bétons légers</i>		
<i>Classe</i>	<i>f_{ck-cyl} (en N/mm^2)</i>	<i>$f_{ck-cube}$ (en N/mm^2)</i>
<i>LC 8/9</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
<i>LC 12/13</i>	<i>12</i>	<i>13</i>
<i>LC 16/18</i>	<i>16</i>	<i>18</i>
<i>LC 20/22</i>	<i>20</i>	<i>22</i>
<i>LC 25/28</i>	<i>25</i>	<i>28</i>
<i>LC 30/33</i>	<i>30</i>	<i>33</i>
<i>LC 35/38</i>	<i>35</i>	<i>38</i>
<i>LC 40/44</i>	<i>40</i>	<i>44</i>
<i>LC 45/50</i>	<i>45</i>	<i>50</i>
<i>LC 50/55</i>	<i>50</i>	<i>55</i>
<i>LC 55/60</i>	<i>55</i>	<i>60</i>
<i>LC 60/66</i>	<i>60</i>	<i>66</i>
<i>LC 70/77</i>	<i>70</i>	<i>77</i>

LC 80/88	80	88
----------	----	----

Tab II.3 : Classe de résistance pour les bétons légers**II.5.3. Classe de masse volumique**

La norme NF EN 206-1 couvre les bétons de masse volumique normale (2000 à 2600 kg/m³), les bétons lourds (masse volumique supérieur à 2600 kg/m³) et les bétons légers (masse volumique comprise entre 800 et 2000 kg/m³).

Les bétons légers sont classés selon plages de masse volumique.

<i>Type de béton en fonction de sa masse volumique</i>	
	<i>Masse volumique (en kg/m³)</i>
<i>Béton léger</i>	<i>de 800 à 2000</i>
<i>Béton de masse volumique normale</i>	<i>de 2000 à 2600</i>
<i>Béton lourd</i>	<i>supérieure à 2600</i>

Tab II.4 : Type de béton en fonction de sa masse volumique**II.5.4. Classes de teneur en chlorures**

La norme NF EN 206-1 définit les teneurs maximales en ions chlorure du béton à respecter en fonction de son type d'utilisation. Elle définit quatre classes de teneur : C1 1,0 / C1 0,4 / C1 0,2 / C1 0,1.

Une cinquième classe a été introduit dans l'Annexe Nationale de la norme NF EN 206-1 : la classe C1 0,65.

Les classes de chlorures permettent d'adapter la composition du béton en fonction des risques de corrosion des armatures.

<i>Classes de chlorures</i>					
<i>Classe de Chlorures</i>	<i>C1 1,0</i>	<i>C1 0,65</i>	<i>C1 0,40</i>	<i>C1 0,20</i>	<i>C1 0,10</i>
<i>Teneur maximale (en Cl⁻)</i>	<i>1 %</i>	<i>0,65 %</i>	<i>0,4 %</i>	<i>0,2 %</i>	<i>0,1 %</i>

Tab II.5 : Les classes des chlorures

La teneur maximale en ions chlorure est définie en pourcentage de la masse du ciment, elle concerne la somme des chlorures de tous les constituants.

<i>Classe de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton</i>	
<i>Utilisation du béton</i>	<i>Classe de chlorure</i>
<i>Béton ne contenant ni armatures en acier ni pièces métalliques noyées</i>	<i>Cl 1,0</i>
<i>Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulés avec un ciment de type CEM III</i>	<i>Cl 0,65</i>
<i>Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées</i>	<i>Cl 0,40</i>
<i>Béton contenant des armatures de précontrainte en acier</i>	<i>Cl 0,20</i>

Tab II.6 : Les classes de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton.

II.5.5. Dimension maximal des granulats

Le béton est spécifié selon la dimension maximale des granulats. La classification est fonction de la dimension nominale supérieure du plus gros granulats présent dans le béton.



Figure II.4 : Les différents granulats.

II.5.6. Classe d'exposition

La norme NF EN 206-1 définit 18 classes d'exposition regroupées par risque de corrosion ou d'attaques dépendant des actions et conditions environnementales auxquelles le béton de l'ouvrage, ou de la partie de l'ouvrage, est soumis. À ces classes sont associées des exigences minimales que le béton doit respecter [39].

En France, la spécification de la classe d'exposition doit être suivie du sigle F (l'Annexe Nationale a adapté les classes d'exposition définies dans la norme EN 206-1 au contexte climatique et géographique français).

Un même béton peut être soumis à plusieurs classes d'exposition différentes. Dans ce cas, le béton doit respecter la sélection des plus sévères exigences définies pour chaque classe.

<i>Désignation de la classe</i>	<i>Description de l'environnement</i>	<i>Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition</i>
1 - Aucun risque de corrosion ni d'attaque		
<i>X0</i>	<i>Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes expositions, sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaque chimique.</i> <i>Béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : très sec.</i>	<i>Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible.</i>
2 - Corrosion induite par carbonatation		
<i>XC1</i>	<i>Sec ou humide en permanence.</i>	<i>Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible.</i> <i>Béton submergé en permanence dans de l'eau.</i>
<i>XC2</i>	<i>Humide, rarement sec.</i>	<i>Surface de béton soumises au contact à long terme de l'eau. Un grand nombre de fondations.</i>
<i>XC3</i>	<i>Humide modérée.</i>	<i>Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé.</i> <i>Béton extérieur abrité de la pluie.</i>

XC4	Alternativement humide et sec.	Surface de béton soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2.
3 - Corrosion induite par les chlorures		
XD1	Humidité modérée.	Surface de béton exposées à des chlorures transportés par voir aérienne.
XD2	Humide, rarement sec.	Piscines. Eléments en béton exposés à des eaux industrielles contenant des chlorures.
XD3	Alternativement humide et sec.	Eléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées. Dalles de parcs de stationnement de véhicules.
4 - Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer		
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structure sur ou à proximité d'une côte.
XS2	Immergé en permanence.	Eléments de structures marines.
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns.	Eléments de structures marines.
5 - Attaque gel/dégel		
XF1	Saturation modérée en eau, sans agents de déverglaçage.	Surfaces verticales de béton exposées à la pluie et au gel.
XF2	Saturation modérée en eau, avec agents de déverglaçage.	Surfaces verticales de béton des ouvrages routiers exposés au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage.

XF3	<i>Forte saturation en eau, sans agents de déverglaçage.</i>	<i>Surface horizontales de béton exposées à la pluie et au gel.</i>
XF4	<i>Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer.</i>	<i>Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage. Surfaces de béton verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel. Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.</i>
6 - Attaques chimiques		
XA1	<i>Environnement à faible agressivité chimique selon l'EN 206-1.</i>	<i>Sols naturels et eau dans le sol.</i>
XA2	<i>Environnement d'agressivité chimique modérée selon l'EN 206-1.</i>	<i>Sols naturels et eau dans le sol.</i>
XA3	<i>Environnement à forte agressivité chimique selon l'EN 206-1.</i>	<i>Sols naturels et eau dans le sol.</i>

Tab II.7 : Les classes d'exposition**II.5.6.1. Classes d'exposition courante**

Elles correspondent aux expositions rencontrées le plus fréquemment dans les ouvrages de bâtiment et de génie civil ; la présentation qui en est faite ci-dessous a été retenue par souci de simplification et ne correspond pas à un regroupement opéré par la norme NF EN 206-1, ni par son Annexe Nationale.

- **X0 : Aucun risque de corrosion, ni d'attaque (gel/dégel, abrasion, attaque chimique)**

Cette classe ne peut concerner que les bétons non armés ou faiblement armés avec un enrobage d'au moins 5 cm.

- **XC : Corrosion induite par carbonatation**

Ces classes s'appliquent au béton contenant des armatures et exposé à l'air et à

l'humidité. Les conditions d'humidité peuvent être considérées comme le reflet de l'humidité ambiante, sauf s'il existe une barrière entre le béton et son environnement.

Les conditions d'humidité définissent les quatre classes d'exposition suivantes :

- XC1 : Sec ou humide en permanence.
- XC2 : Humide rarement sec (mêmes exigences minimales que pour XC1 en France).
- XC3 : Humidité modérée (mêmes exigences minimales que pour XF1 en France).
- XC4 : Alternance d'humidité et de séchage (mêmes exigences minimales que pour XF1 en France).

Pour les ouvrages d'art, les bétons exposés à l'air situés en atmosphère extérieure relèvent de la classe d'exposition XC4 (fascicule 65).

- **XF : Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage**

Ces classes s'appliquent lorsque le béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gel/dégel alors qu'il est mouillé :

- XF1 : Faible saturation en eau sans agent de déverglaçage.
- XF2 : Faible saturation en eau avec agents de déverglaçage.
- XF3 : Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage.
- XF4 : Forte saturation en eau avec agents de déverglaçage.

En France, sauf spécifications particulières fondées sur l'état de saturation en eau du béton, les classes d'exposition XF1 à XF4 sont indiquées sur la carte des zones de gel ci-après.

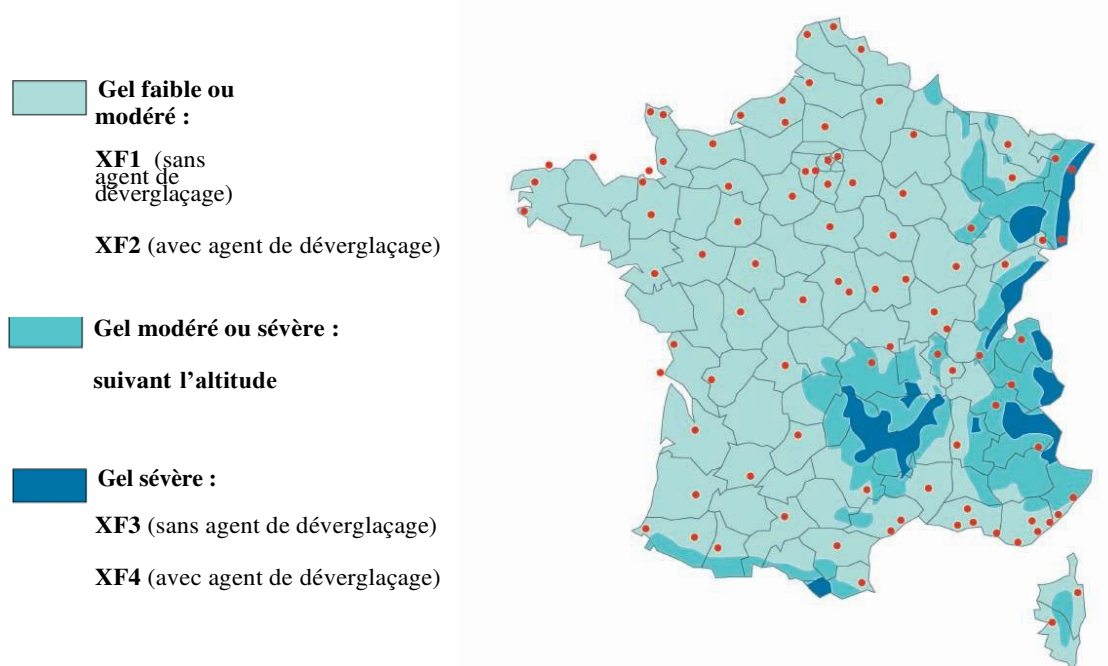


Figure II.5 : Carte des zones de gel [38]

Pour les classes d'exposition courantes, les valeurs limites spécifiées sont les suivantes:

<i>Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition courantes</i>						
<i>Classes d'exposition</i>	<i>X0</i>	<i>XC1/XC2</i>	<i>XF1 XC2, XC4, XD1</i>	<i>XF2</i>	<i>XF3</i>	<i>XF4</i>
<i>E_{EFF}/Liant équivalent maximal</i>	-	0,65	0,60	0,55	0,55	0,45
<i>Classe de résistance minimale</i>	-	C20/25	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
<i>Teneur minimale en liant équivalent (kg/m³)</i>	150	260	280	300	315	340
<i>Teneur minimale en air (%)</i>	-	-	-	4	4	4
<i>Additions maximales ex : cendres volantes</i>	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,15

Tab II.8 : Valeurs limites spécifiées pour les classes d'expositions courantes [38]

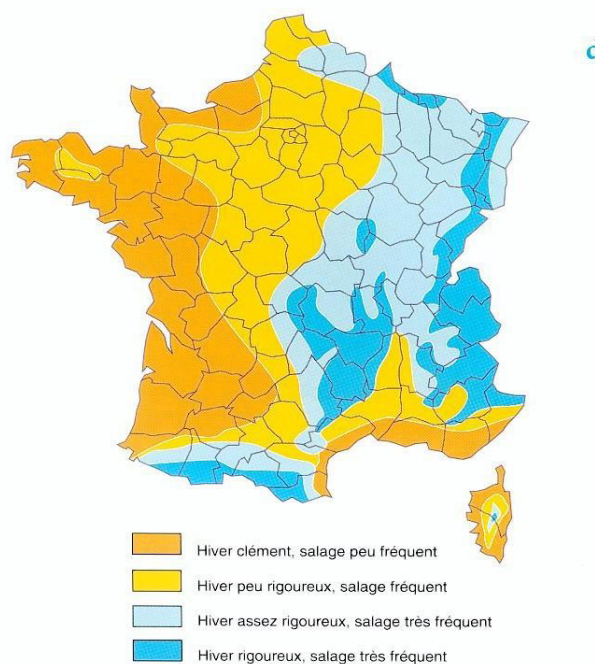
❖ Cas des ouvrages d'art

• Prise en compte des attaques gel/dégel.

En complément de la carte des zones de gel définie par la figure NA.2 de la norme NF EN 206-1, le Fascicule 65 précise les classes à prendre en compte en fonction

du niveau de salage de l'itinéraire sur lequel est situé l'ouvrage.

Figure II.6 : Carte des zones de rigueur hivernale SERTA



<i>Classes d'exposition à retenir en fonction du lieu de l'ouvrage</i>		
	<i>Zones de gel modéré</i>	<i>Zone de gel severe</i>
<i>Salage peu frequent</i>	<i>XF1</i>	<i>XF3</i>
<i>Salage frequent</i>	<i>XD3 +XD2 (pour les parties d'ouvrage très exposées)</i>	<i>XF4</i>
<i>Salage très frequent</i>	<i>XF4</i>	<i>XF4</i>

Tab II.9 : Classes d'exposition à retenir en fonction du lieu de l'ouvrage

II.5.6.2. Classes d'exposition particulières

Ces classes concernent des ouvrages exposés à l'eau de mer, à des chlorures ou à des milieux chimiquement agressifs.

- **XS : Corrosion induite par des chlorures présents dans l'eau de mer**

Ces classes s'appliquent lorsque le béton, contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées, est soumis aux chlorures présents dans l'eau de mer ou à

l'action de l'air véhiculant du sel marin.

Les différentes classes d'exposition sont :

- XS1 : Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer.
Cette classe est à utiliser pour les structures situées à moins de 1 km de la côte (AN).
- XS2 : Immergé en permanence.
- XS3 : Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns.

- **XD : Corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre que marine.**

Ces classes s'appliquent lorsque le béton, contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées, est soumis au contact d'une eau autre que marine, contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage entraînés par des véhicules.

Les différentes classes d'exposition sont :

- XD1 : Humidité modérée.
- XD2 : Humide, rarement sec.
- XD3 : Alternance d'humidité et de séchage.

- **XA : Attaque chimique.**

Ces classes s'appliquent lorsque le béton est exposé aux attaques chimiques, se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface ou les eaux souterraines :

- XA1 : Environnement à faible agressivité chimique.
- XA2 : Environnement d'agressivité chimique modérée.
- XA3 : Environnement à forte agressivité chimique.

II.5.6.3. Valeurs limites pour le classement des attaques chimiques

La norme NF EN 206-1 définit les valeurs limites des paramètres correspondants aux attaques chimiques.

Ces seuils correspondants à des caractéristiques chimiques des eaux de surfaces et souterraines ou des sols [38].

<i>Valeurs limites pour les attaques chimiques des eaux de surfaces et souterraines</i>			
<i>Caractéristiques Chimiques</i>	<i>Sous classe d'exposition</i>		
	<i>XA1</i>	<i>XA2</i>	<i>XA3</i>
<i>SO₄²⁻ en mg/l</i>	<i>200 à 600</i>	<i>600 à 3 000</i>	<i>3 000 à 6 000</i>
<i>PH</i>	<i>5,5 à 6,5</i>	<i>4,5 à 5,5</i>	<i>4 à 4,5</i>
<i>CO₂ en mg/l</i>	<i>15 à 40</i>	<i>40 à 100</i>	<i>de 100 jusqu'à saturation</i>
<i>NH₄⁺ en µg/l</i>	<i>15 à 30</i>	<i>30 à 60</i>	<i>60 à 100</i>
<i>Mg²⁺ en mg/l</i>	<i>300 à 1 000</i>	<i>1 000 à 3 000</i>	<i>de 3 000 jusqu'à saturation</i>

Tab II.10 : Valeurs limites pour les attaques chimiques des eaux de surfaces et souterraines

Remarque:

Le choix de la classe se fait par rapport à la caractéristique chimique conduisant à l'agression la plus élevée.

Pour ce type d'environnement, l'Annexe Nationale de la norme NF EN 206-1 renvoie au fascicule de documentation P 18-011 « Bétons - classification des environnements agressifs », notamment pour le choix de ciments [38].

<i>Valeurs limites par les attaques chimiques des sols naturels</i>			
<i>Caractéristiques Chimiques</i>	<i>Sous classe d'exposition</i>		
	<i>XA1</i>	<i>XA2</i>	<i>XA3</i>
<i>SO₄²⁻ en mg/l</i>	<i>2 000 à 3 000</i>	<i>3 000 à 12 000</i>	<i>12 000 à 24 000</i>
<i>Acidité ml/kg</i>	<i>Supérieur à 200 Baumann Gully</i>	<i>n'est pas rencontré dans la pratique</i>	

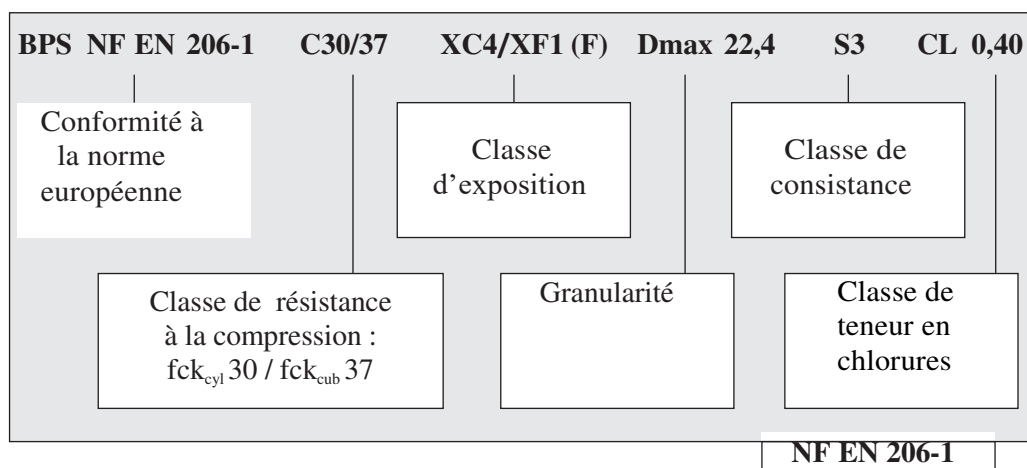
Tab II.11 : Valeurs limites par les attaques chimiques des sols nature

Pour les classes d'exposition particulières, les valeurs limites spécifiées sont les suivantes :

<i>Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition particulières</i>							
<i>Classes d'exposition</i>	<i>MARINS</i>		<i>CHLORES</i>		<i>CHIMIQUES</i>		
	<i>XS2/XS1</i>	<i>XS3</i>	<i>XD2</i>	<i>XD3</i>	<i>XA1</i>	<i>XA2</i>	<i>XA3</i>
<i>EFF/Liant équivalent maximale</i>	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45
<i>Classe de résistance minimale</i>	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C40/50
<i>Teneur minimale en liant équivalent (kg/m³)</i>	330	350	330	350	330	350	385
<i>Teneur minimale en air (%)</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Additions maxi ex : cendres volantes</i>	0,15	0,15	0,15	0,15	0,30	0,15	0,00
<i>Nature ciment</i>	PM	PM	-	-	-	-	P18-011

Tab II.12 : Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition particulières

II.5.6.4. Désignation d'un BPS conforme à la norme NF EN 206-1



II.5.6.5. Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons

La norme NF EN 206-1 définit des valeurs limites spécifiées relatives à la composition et aux propriétés du béton en fonction de chaque classe d'exposition

dans les tableaux II.13.

<i>Valeurs limites spécifiques applicables en France à la composition et aux propriétés du béton</i>					
<i>Classes d'exposition</i>		<i>Rapport E_{eff}/ Liant éq Maximal</i>	<i>Classe de résistance minimale</i>	<i>Teneur minimale en Liant éq. (kg/m³)</i>	<i>Teneur minimale en air (%)</i>
<i>Aucun risqué de corrosion ou d'attaque</i>		<i>X0</i>	–	150	–
<i>Carbonatation</i>		<i>XC 1</i>	0,65	C20/25	–
		<i>XC 2</i>	0,65	C20/25	–
		<i>XC 3</i>	0,60	C25/30	–
		<i>XC 4</i>	0,60	C25/30	–
<i>Corrosion induite par les chlorures</i>	<i>Eau de mer</i>	<i>XS 1</i>	0,55	C30/37	–
		<i>XS 2</i>	0,55	C30/37	–
		<i>XS 3</i>	0,50	C35/45	–
	<i>Chlorures autres qu'111e l'eau de mer</i>	<i>XD 1</i>	0,60	C25/30	–
		<i>XD 2</i>	0,55	C30/37	–
		<i>XD 3</i>	0,50	C35/45	–
<i>Attaque gel/dégel</i>		<i>XF 1</i>	0,60	C25/30	–
		<i>XF 2</i>	0,55	C25/30	4,0
		<i>XF 3</i>	0,55	C30/37	4,0
		<i>XF 4</i>	0,45	C30/37	4,0
<i>Environnement contenant des substances chimiques agressives</i>		<i>XA 1</i>	0,55	C30/37	–
		<i>XA 2</i>	0,50	C35/45	–
		<i>XA 3</i>	0,45	C40/50	–

Tab II.13 : Valeurs limites spécifiques applicables en France à la composition et aux propriétés du béton.

II.6. Exemple de classe d'exposition

- **Ponts (ex : pont à haubans)**

Un élément en béton d'un ouvrage peut être soumis à plusieurs actions environnementales. Il faut donc lui associer plusieurs classes d'exposition. Le béton devra respecter pour chaque propriété l'exigence la plus sévère demandée par ses classes d'exposition. Une combinaison de classe d'exposition est située dans le pont, comme indiqué dans la figure suivante :

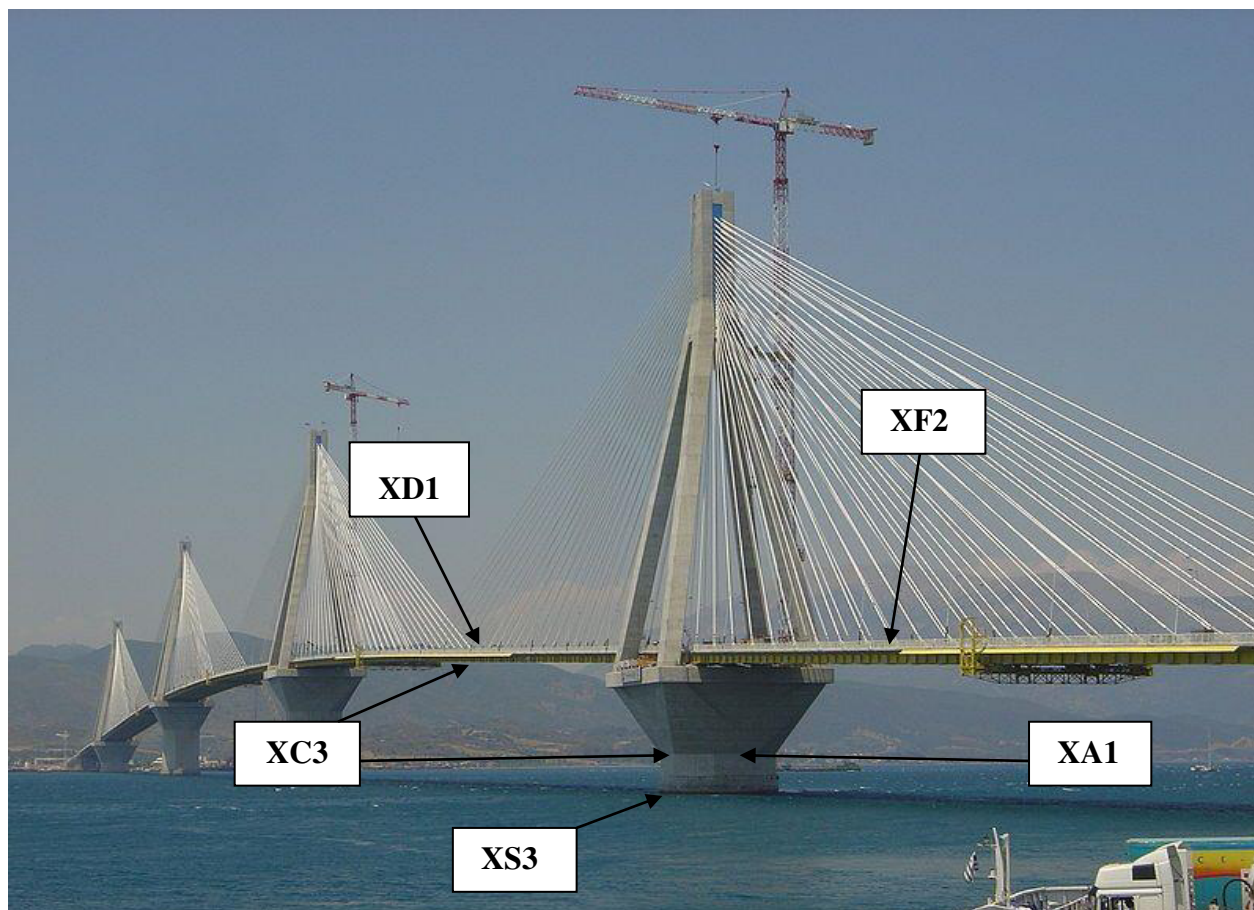


Figure II.7: Combinaison de classe d'exposition - Exemple : XA₁ / XF₂ / XC₃ ...

- **Bâtiment**

La norme NF EN 206-1 définit des exemples de classe d'exposition pour le bâtiment, Nous avons pris 4 exemples de chaque emplacement, pour attribuer les classes d'exposition dans les éléments de base du bâtiment, comme indiqué dans les quatre tableaux suivants :

<i>Intérieur des terres - Gel faible ou modéré</i>			
Infrastructure	<i>Fondations non armée (gros béton et béton de propreté)</i>		<i>X0</i>
	<i>Fondations armée</i>		<i>XC2</i>
	<i>Longrine totalement enterrée</i>		<i>XC2</i>
	<i>Longrine partiellement enterrée</i>		<i>XC4 - XF1</i>
	<i>Sous-sol (cave ou garage)</i>	<i>Plancher bas et haut</i>	<i>XC1</i>
		<i>Mur intérieur</i> <i>Mur au contact de la terre</i>	<i>XC1</i> <i>XC2 - XF1</i>
	<i>Vide sanitaire ou vide technique</i>	<i>Plancher haut</i>	<i>XC3</i>
<i>Mur intérieur</i>		<i>XC3</i>	
<i>Mur extérieur</i>		<i>XC4 - XF1</i>	
<i>Dallage extérieur</i>			<i>XC4 - XF1</i>
Superstructure	<i>Local clos et couvert sans phénomène de condensation persistante (plancher courant, cuisine, sanitaires, salle d'eau...)</i>	<i>Plancher bas et haut</i>	<i>XC1</i>
		<i>Mur intérieur</i>	<i>XC1</i>
Superstructure	<i>Local clos et couvert avec phénomène de condensation persistante (buanderie, papeterie, local piscine...)</i>	<i>Plancher bas et haut</i>	<i>XC3</i>
		<i>Mur intérieur</i>	<i>XC3</i>

	<i>Mur extérieur protégé (avec bardage ou isolation extérieure)</i>		<i>XC1</i>
	<i>Mur extérieur non protégé</i>		<i>XC4 - XF1</i>
	<i>Balcon ou loggia non protégé (sans étanchéité)</i>		<i>XC4 - XF1</i>
	<i>Plancher terrasse avec étanchéité</i>		<i>XC1</i>
	<i>Acrotère non protégé</i>		<i>XC4 - XF1</i>
Parking ouvert	<i>Mur intérieur</i>		<i>XC3</i>
	<i>Mur extérieur</i>		<i>XC4 - XF1</i>
	<i>Plancher intérieur</i>	<i>Sans agent de déverglaçage</i> <i>Avec agent de déverglaçage</i>	<i>XC3 - XF1</i> <i>XC3 - XD1 - XF2</i>
	<i>Plancher ou rampe extérieur non protégé (sans étanchéité)</i>	<i>Sans agent de déverglaçage</i> <i>Avec agent de déverglaçage</i>	<i>XC4 - XF1</i> <i>XC4 - XD1 - XF2</i>
	<i>Acrotère non protégé</i>	<i>Sans agent de déverglaçage</i> <i>Avec agent de déverglaçage</i>	<i>XC4 - XF1</i> <i>XC4 - XD1 - XF2</i>

Tab II.14 : Exemple de classe d'exposition pour le bâtiment (intérieur des terres – gel faible ou modéré)

Intérieur des terres - Gel severe			
Infrastructure	<i>Fondations non armée (gros béton et béton de propreté)</i>		<i>X0</i>
	<i>Fondations armée</i>		<i>XC2</i>
	<i>Longrine totalement enterrée</i>		<i>XC2</i>
	<i>Longrine partiellement enterrée</i>		<i>XC4 - XF3</i>
	<i>Sous-sol (cave ou garage)</i>	<i>Plancher bas et haut</i> <i>Mur intérieur</i> <i>Mur au contact de la terre</i>	<i>XC1</i> <i>XC1</i> <i>XC2 - XF3</i>
	<i>Vide sanitaire ou vide technique</i>	<i>Plancher haut</i> <i>Mur intérieur</i> <i>Mur extérieur</i>	<i>XC3</i> <i>XC3</i> <i>XC4 - XF3</i>
<i>Dallage extérieur</i>			<i>XC4 - XF3</i>
Superstructure	<i>Local clos et couvert sans phénomène de condensation persistante (plancher courant, cuisine, sanitaires, salle d'eau...)</i>	<i>Plancher bas et haut</i> <i>Mur intérieur</i>	<i>XC1</i> <i>XC1</i>
	<i>Local clos et couvert avec phénomène de condensation persistante (buanderie, papeterie, local piscine...)</i>	<i>Plancher bas et haut</i> <i>Mur intérieur</i>	<i>XC3</i> <i>XC3</i>
	<i>Mur extérieur protégé (avec bardage ou isolation extérieure)</i>		<i>XC1</i>
	<i>Mur extérieur non protégé</i>		<i>XC4 - XF3</i>
	<i>Balcon ou loggia non protégé (sans étanchéité)</i>		<i>XC4 - XF3</i>
	<i>Plancher terrasse avec étanchéité</i>		<i>XC1</i>
Parking ouvert	<i>Acrotère non protégé</i>		<i>XC4 - XF3</i>
	<i>Mur intérieur</i>		<i>XC3</i>
	<i>Mur extérieur</i>		<i>XC4 - XF3</i>
	<i>Plancher intérieur</i>	<i>Sans agent de déverglaçage</i> <i>Avec agent de déverglaçage</i>	<i>XC3 - XF3</i> <i>XC3 - XD1 - XF4</i>
	<i>Plancher ou rampe extérieur non protégé (sans étanchéité)</i>	<i>Sans agent de déverglaçage</i> <i>Avec agent de déverglaçage</i>	<i>XC4 - XF3</i> <i>XC4 - XD1 - XF4</i>
	<i>Acrotère non protégé</i>	<i>Sans agent de déverglaçage</i> <i>Avec agent de déverglaçage</i>	<i>XC4 - XF3</i> <i>XC4 - XD1 - XF4</i>

Tab II.15 : Exemple de classe d'exposition pour le bâtiment (intérieur des terres –gel sévère)

Bord de mer - Entre 100 m (parfois 500 m) et 1 km (parfois 5 km) de la côte			
Infrastructure	<i>Fondations non armée (gros béton et béton de propreté)</i>		<i>X0</i>
	<i>Fondations armée</i>		<i>XC2</i>
	<i>Longrine totalement enterrée</i>		<i>XC2</i>
	<i>Longrine partiellement enterrée</i>		<i>XC4 - XS1 - XF1</i>
	<i>Sous-sol (cave ou garage)</i>	<i>Plancher bas et haut</i> <i>Mur intérieur</i> <i>Mur au contact de la terre</i>	<i>XC1</i> <i>XC1</i> <i>XC2 - XS1 - XF1</i>

	<i>Vide sanitaire ou vide technique</i>	<i>Plancher haut</i> <i>Mur intérieur</i> <i>Mur extérieur</i>	<i>XC3 - XS1</i> <i>XC3 - XS1</i> <i>XC4 - XS1 - XF1</i>
	<i>Dallage extérieur</i>		<i>XC4 - XS1 - XF1</i>
Superstructure	<i>Local clos et couvert sans phénomène de condensation persistante (plancher courant, cuisine, sanitaires, salle d'eau...)</i>	<i>Plancher bas et haut</i> <i>Mur intérieur</i>	<i>XC1</i> <i>XC1</i>
	<i>Local clos et couvert avec phénomène de condensation persistante (buanderie, papeterie, local piscine...)</i>	<i>Plancher bas et haut</i> <i>Mur intérieur</i>	<i>XC3</i> <i>XC3</i>
	<i>Mur extérieur protégé (avec bardage ou isolation extérieure)</i>		<i>XC1</i>
	<i>Mur extérieur non protégé</i>		<i>XC4 - XS1 - XF1</i>
	<i>Balcon ou loggia non protégé (sans étanchéité)</i>		<i>XC4 - XS1 - XF1</i>
	<i>Plancher terrasse avec étanchéité</i>		<i>XC1</i>
	<i>Acrotère non protégé</i>		<i>XC4 - XS1 - XF1</i>
Parking ouvert	<i>Mur intérieur</i>		<i>XC3 - XS1</i>
	<i>Mur extérieur</i>		<i>XC4 - XS1 - XF1</i>
	<i>Plancher intérieur</i>	<i>Sans agent de déverglacage</i> <i>Avec agent de déverglacage</i>	<i>XC3 - XS1 - XF1</i> <i>XC3 - XS1 - XD1 - XF2</i>
	<i>Plancher ou rampe extérieur non protégé (sans étanchéité)</i>	<i>Sans agent de déverglacage</i> <i>Avec agent de déverglacage</i>	<i>XC4 - XS1 - XF1</i> <i>XC4 - XS1 - XD1 - XF2</i>
	<i>Acrotère non protégé</i>		<i>XC4 - XS1 - XF1</i> <i>XC4 - XS1 - XD1 - XF2</i>

Tab II.16 : Exemple de classe d'exposition pour le bâtiment (bord de mer – entre 100 m (parfois 500 m) et 1km (parfois 5 m) de la côte)

Front de mer - moins de 100 m (parfois 500 m) de la côte			
Infrastructure	<i>Fondations non armée (gros béton et béton de propreté)</i>		<i>X0</i>
	<i>Fondations armée</i>		<i>XC2</i>
	<i>Longrine totalement enterrée</i>		<i>XC2</i>
	<i>Longrine partiellement enterrée</i>		<i>XC4 - XS3 - XF1</i>
	<i>Sous-sol (cave ou garage)</i>	<i>Plancher bas et haut</i> <i>Mur intérieur</i> <i>Mur au contact de la terre</i>	<i>XC1</i> <i>XC1</i> <i>XC2 - XS3 - XF1</i>
	<i>Vide sanitaire ou vide technique</i>	<i>Plancher haut</i> <i>Mur intérieur</i> <i>Mur extérieur</i>	<i>XC3 - XS3</i> <i>XC3 - XS3</i> <i>XC4 - XS3 - XF1</i>
	<i>Dallage extérieur</i>		<i>XC4 - XS3 - XF1</i>
Superstructure	<i>Local clos et couvert sans phénomène de condensation persistante (plancher courant, cuisine, sanitaires, salle d'eau...)</i>	<i>Plancher bas et haut</i> <i>Mur intérieur</i>	<i>XC1</i> <i>XC1</i>
	<i>Local clos et couvert avec phénomène de condensation persistante (buanderie, papeterie, local piscine...)</i>	<i>Plancher bas et haut</i> <i>Mur intérieur</i>	<i>XC3</i> <i>XC3</i>
	<i>Mur extérieur protégé (avec bardage ou isolation extérieure)</i>		<i>XC1</i>
	<i>Mur extérieur non protégé</i>		<i>XC4 - XS3 - XF1</i>
	<i>Balcon ou loggia non protégé (sans étanchéité)</i>		<i>XC4 - XS3 - XF1</i>
	<i>Plancher terrasse avec étanchéité</i>		<i>XC1</i>
	<i>Acrotère non protégé</i>		<i>XC4 - XS3 - XF1</i>
Parking ouvert	<i>Mur intérieur</i>		<i>XC3 - XS3</i>
	<i>Mur extérieur</i>		<i>XC4 - XS3 - XF1</i>
	<i>Plancher intérieur</i>	<i>Sans agent de déverglacage</i> <i>Avec agent de déverglacage</i>	<i>XC3 - XS3 - XF1</i> <i>XC3 - XS3 - XD1 - XF2</i>
	<i>Plancher ou rampe extérieur non protégé (sans étanchéité)</i>	<i>Sans agent de déverglacage</i> <i>Avec agent de déverglacage</i>	<i>XC4 - XS3 - XF1</i> <i>XC4 - XS3 - XD1 - XF2</i>
	<i>Acrotère non protégé</i>		<i>XC4 - XS3 - XF1</i> <i>XC4 - XS3 - XD1 - XF2</i>

Tab II.17 : Exemple de classe d'exposition pour le bâtiment (front de mer – moins de 100 m (parfois 500 m) de la côte)

II.7. Durabilité – Enrobage

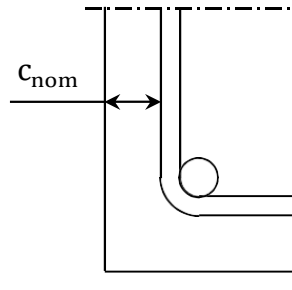
II.7.1. Enrobage nominal (c_{nom})

L'enrobage est la distance entre la surface de l'armature la plus proche de la surface du béton et cette dernière.

L'enrobage nominal c_{nom} doit être spécifié sur les plans. Il est défini comme l'enrobage minimal

c_{min} plus une marge de calcul pour tolérance d'exécution Δc_{dev} :

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$



II.7.2. Enrobage minimal (c_{min})

$$c_{min} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} c_{min} \\ c_{min,dur} + \Delta c_{dur,y} - \Delta c_{dur,ct} - \Delta c_{dur,add} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right.$$

avec : $c_{min,b}$: enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence.

$c_{min,dur}$: enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement.

$\Delta c_{dur,y}$: marge de sécurité.

$\Delta c_{dur,c}$: réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable.

$\Delta c_{dur,add}$: réduction de l'enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire.

L'Eurocode 2 et son annexe nationale recommande les valeurs suivantes :

$$\Delta c_{dur,y} = 0$$

$$\Delta c_{dur,ct} = 0$$

II.7.3. Enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence ($c_{\min,b}$)

Si armature individuelle : $c_{\min,b}$ = diamètre de la barre ϕ

Si paquet d'armatures : $c_{\min,b}$ = diamètre équivalent ϕ_n

Avec : $\phi_n = \phi \times \sqrt{nb} \leq 55 \text{ mm}$

Avec : n_b : nombre de barres du paquet

ϕ : diamètre individuel des barres du paquet

Si la dimension nominale du plus gros granulat est supérieure à 32 mm, il convient de majorer $c_{\min,b}$ de 5 mm

II.7.4. Enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement ($c_{\min,dur}$)

Les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 et XF4 ne figurent pas dans le tableau permettant de déterminer $c_{\min,dur}$ en fonction des conditions d'environnement.

Il faut donc utiliser le tableau de correspondance suivant :

	Classe d'exposition			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Salage peu fréquent	XC4	Sans objet	XC4 si le béton est formulé sans entraîneur d'air XD1 si le béton est formulé avec entraîneur d'air	Sans objet
Salage fréquent	Sans objet	XD1 ou XD3 pour les éléments très exposés (*)	Sans objet	XD2 ou XD3 pour les éléments très exposés (*)
Salage très fréquent	Sans objet	Sans objet	Sans objet	XD3

Tab II.18 : Des correspondances pour les classes d'exposition XF1, XF2, XF3 et XF4

Classe structurale	Classe d'exposition						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1 XS1 XA1	XD2 XS2 XA2	XD3 XS3 XA3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Tab II.19 : Des valeurs Tableau des valeurs $c_{min,dur}$ (en mm) en fonction de la classe d'exposition

II.8. Aide au choix des classes d'expositions pour les ouvrages d'art

II.8.1. Mode d'emploi des tableaux

L'aide au choix des classes d'exposition est déclinée, pour les classes d'exposition liées aux risques de carbonatation, agression par les chlorures, gel-dégel et attaques chimiques, en quatre tableaux II.20 à II.23 ci-après portant en lignes les parties d'ouvrages, et en colonnes les risques considérés, avec pour certains risques différents niveaux de sévérité correspondant à des sous-colonnes.

Ces tableaux correspondent à quatre zones d'environnement (liées notamment à la localisation géographique de l'ouvrage) exclusives pour la France métropolitaine et la plupart des D.O.M./T.O.M. La définition de ces zones fait référence en particulier à la clause 4.2 (2) de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1, en termes de distance à la côte et de sévérité du gel. Pour les quelques territoires soumis à la fois à un environnement maritime et au gel sévère il convient d'utiliser les indications des tableaux II.20 ou II.21 liés à l'environnement maritime pour les classes d'exposition XC et XS, et celles du tableau 4 lié à l'environnement en zone de gel sévère pour les autres classes, notamment XD et XF.

Dans l'aide au choix des classes d'exposition vis-à-vis du gel (XF), il est tenu compte des interprétations actualisées de la norme NF EN 206-1 en cours d'harmonisation avec les autres textes [38].

II.8.2. Salage

En application de la clause 4.2 (2) de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1 (notes 4 et 6 le choix de la classe XD1, XD2 ou XD3 se réfère non seulement à

l'effet aggravant des cycles d'humidification / séchage, selon les indications du tableau II.20 de la norme NF EN 1992-1-1, mais également à la fréquence de salage des chaussées.

Dans les tableaux II.20 à II.23 ci-après l'appréciation du salage se réfère à la voie franchie par l'ouvrage, sauf :

- Pour les dalles de transition, solins de joints de dilatation, barrières de sécurité en béton, longrines d'ancrage, massifs d'ancrage d'équipements et garde-corps en béton où on l'apprécie par rapport à la voie portée,
- Pour les corniches et corniches caniveaux où on l'apprécie à la fois par rapport à la voie portée et à la voie franchie.

Le salage est considéré comme « peu fréquent » lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, « très fréquent » lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et « fréquent » entre ces deux cas. En application de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-2 les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée sont réputées exposées ou très exposées aux projections de sels de déverglaçage, selon la fréquence du salage. Quelle que soit la fréquence de salage des routes et la zone géographique, certaines parties d'ouvrages peuvent ne pas être exposées aux effets du salage (appuis d'un ouvrage franchissant un vallon sans voie de communication, partie supérieure du tablier d'un ouvrage ferroviaire, par exemple), on considèrera alors pour ces parties d'ouvrages la colonne « salage peu fréquent ».

- **Présentation des tableaux**

En quatre tableaux II.20 à II.23 ci-après portant en lignes les parties d'ouvrages, et en colonnes les risques considérés, avec pour certains risques différents niveaux de sévérité correspondant à des sous-colonnes.

Ces tableaux correspondent à quatre zones d'environnement (liées notamment à la localisation géographique de l'ouvrage) exclusives pour la France métropolitaine et la plupart.

Parties d'ouvrage	XC	XS	XD		XF		XA
			salage peu fréquent*	salage fréquent*	salage peu fréquent*	salage fréquent*	
fondations (pieux, barrettes, puits marocains, bétons de blocage, semelles, radiers...)							
fondations de tous types entièrement immergées	XC1	XS2	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
fondations de tous types en zone de marnage	XC4	XS3	-	-	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
fondations profondes enterrées hors eau de mer	XC2	XS1	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XC4	XS3	-	XD1 ou XD3 selon salage de la voie franchie	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	-
fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XC2	XS1	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
appuis (chevêtres sur pieux, piles, chevêtres sur piles, piédroits, culées y compris murs en retour...), parties d'ouvrages en contact avec le terrain, voûtes							
parties immergées	XC1	XS2	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
parties en zone de marnage	XC4	XS3	-	-	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
parties enterrées	XC2	XS1	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
parties à l'air libre	XC4	XS3	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie Franchie	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	-
faces intérieures des piles ou culées creuses	XC3	XS1	-	-	XF1	XF1	-
dalles de transition	XC2	XS1	-	XD2	XF1	XF2	-
tablier (poutres, hourdis, dalles, caissons, traverses de ponts cadres, entretoises)							
face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	XC3	-	-	-	XF1	XF1	-
faces extérieures	XC4	XS3	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie Franchie	XF1	XF1 ou XF2 selon salage et distance de la voie franchie	-
faces intérieures des caissons	XC3	XS1	-	-	XF1	XF1	-
équipements et superstructures							
Cornices	XC4	XS3	-	XD1 ou XD3 selon salage	XF1	XF2	-
solins de joints de dilatation	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-
contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-
barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-
massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-
corniches-caniveaux	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-

Tab II.20 : Ouvrages d'art situés en mer, ou à moins de 100 m de la côte (ou jusqu'à 500 m de la côte, suivant la topographie particulière, lorsque les parties aériennes sont soumises à un risque d'exposition aux embruns)

Parties d'ouvrage	XC	XS	XD		XF		XA
			salage peu fréquent*	salage fréquent*	salage peu fréquent*	salage fréquent*	
fondations (pieux, barrettes, puits marocains, bétons de blocage, semelles, radiers...)							
fondations de tous types entièrement immergées (rivière ou eau saumâtre ou marée)	XC1	XS2	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
fondations de tous types en zone de marnage (rivière ou eau saumâtre ou marée)	XC4	XS3	-	-	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
fondations profondes enterrées hors eau	XC2	-	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XC4	XS1	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	-
fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XC2	-	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
appuis (chevêtres sur pieux, piles, chevêtres sur piles, piédroits, culées y compris murs en retour...), parties d'ouvrages en contact avec le terrain, voûtes							
parties immergées (rivière ou eau saumâtre ou marée)	XC1	XS2	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
parties en zone de marnage (rivière ou eau saumâtre ou marée)	XC4	XS3	-	-	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
parties enterrées	XC2	-	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
parties à l'air libre	XC4	XS1	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	-
faces intérieures des piles ou culées creuses	XC3	-	-	-	XF1	XF1	-
dalles de transition	XC2	-	-	XD2	XF1	XF2	-
tablier (poutres, hourdis, dalles, caissons, traverses de ponts cadres, entretoises)							
face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	XC3	-	-	-	XF1	XF1	-
faces extérieures	XC4	XS1	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF1 ou XF2 selon salage et distance de la voie franchie	-
faces intérieures des caissons	XC3	-	-	-	XF1	XF1	-
équipements et superstructures							
Cornices	XC4	XS1	-	XD1 ou XD3 selon salage	XF1	XF2	-
solins de joints de dilatation	XC4	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-
contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	XC4	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-
barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XC4	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-
massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	XC4	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-
corniches-caniveaux	XC4	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-

Tab II.21 : Ouvrages d'art situés à moins de 1 km de la côte (ou jusqu'à 5 km de la côte, suivant la topographie particulière) lorsque les parties aériennes de ces ouvrages sont exposées à un air véhiculant du sel marin, mais pas directement aux embruns

Parties d'ouvrage	XC	XS	XD			XF			XA
			salage peu fréquent*	salage fréquent*	salage très fréquent*	salage peu fréquent*	salage fréquent*	salage très fréquent*	
fondations (pieux, barrettes, puits marocains, bétons de blocage, semelles, radiers...)									
fondations de tous types entièrement immergées (eau douce**)	XC1	-	-	-	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
fondations de tous types en zone de marnage (eau douce**)	XC4	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
fondations profondes enterrées hors eau de mer	XC2	-	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	-	-	-	selon analyse sol et eau
fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XC4	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	XF2, XF4 si très exposé aux sels	-
fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XC2	-	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	-	-	-	selon analyse sol et eau
appuis (chevêtres sur pieux, piles, chevêtres sur piles, piédroits, culées y compris murs en retour...), parties d'ouvrages en contact avec le terrain, voûtes									
parties immergées (eau douce**)	XC1	-	-	-	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
parties en zone de marnage (eau douce**)	XC4	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
parties enterrées	XC2	-	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	-	-	-	selon analyse sol et eau
parties à l'air libre	XC4	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	XF2, XF4 si très exposé aux sels	-
faces intérieures des piles ou culées creuses	XC3	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
dalles de transition	XC2	-	-	XD2	XD2	XF1	XF2	XF2	-
tablier (poutres, hourdis, dalles, caissons, traverses de ponts cadres, entretoises)									
face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	XC3	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
faces extérieures	XC4	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF2	XF2, XF4 si très exposé aux sels	-
faces intérieures des caissons	XC3	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
équipements et superstructures									
Corniches	XC4	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-
solins de joints de dilatation	XC4	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-
contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	XC4	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-
barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XC4	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-
massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalization	XC4	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-

corniches-caniveaux	XC4	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-
---------------------	-----	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	---

Tab II.22 : Ouvrages d'art à l'intérieur des terres en zone de gel faible ou modéré

Parties d'ouvrage	XC	XS	XD			XF			XA
			salage peu fréquent*	salage fréquent*	salage très fréquent*	salage peu fréquent*	salage fréquent*	salage très fréquent*	
fondations (pieux, barrettes, puits marocains, bétons de blocage, semelles, radiers...)									
fondations de tous types entièrement immergées (eau douce**)	XC1	-	-	-	-	XF3	XF3	-	selon analyse sol et eau
fondations de tous types en zone de marnage (eau douce**)	XC4	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3	selon analyse sol et eau
fondations profondes enterrées hors eau de mer	XC2	-	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	XF3	XF3	-	selon analyse sol et eau
fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XC4	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3	XF3	XF3, XF4 si très exposé aux sels	XF4	-
fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XC2	-	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	XF3	XF3	XF3	selon analyse sol et eau
appuis (chevêtres sur pieux, piles, chevêtres sur piles, piédroits, culées y compris murs en retour...), parties d'ouvrages en contact avec le terrain, voûtes									
parties immergées (eau douce**)	XC1	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3	selon analyse sol et eau
partie en zone de marnage (eau douce**)	XC4	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3	selon analyse sol et eau
parties enterrées	XC2	-	-	pas d'exposition XD, ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	XF3	XF3	XF3	selon analyse sol et eau
parties à l'air libre	XC4	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3	XF3	XF3, XF4 si très exposé aux sels	XF4	-
faces intérieures des piles ou culées creuses	XC3	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3	-
dalles de transition	XC2	-	-	XD2	XD2	XF3	XF3	XF4	-
tablier (poutres, hourdis, dalles, caissons, traverses de ponts cadres, entretoises)									
face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	XC3	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3	-
faces extérieures	XC4	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF3	XF3 ou XF4 selon salage et distance de la voie franchie	XF3 ou XF4 selon salage et distance de la voie franchie	-
faces intérieures des caissons	XC3	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3	-
équipements et superstructures									
Corniches	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4	XF4	-
solins de joints de dilatation	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4	XF4	-
contre-corniches et longrines d'ancrage	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4	XF4	-

<i>de</i> <i>barrière de sécurité</i> <i>(non revêtues)</i>									
<i>barrières de sécurité</i> <i>en béton, garde-</i> <i>corps,</i> <i>écrans acoustiques</i>	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4	XF4	-
<i>massifs d'ancrage</i> <i>(non revêtus) des</i> <i>candélabres, PPHM</i> <i>et panneaux de</i> <i>signalization</i>	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4	XF4	-
<i>corniches-caniveaux</i>	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4	XF4	-

Tab II.23 : Ouvrages d'art à l'intérieur des terres en zone de gel sévère.

II.9. Contrôle de conformité

La norme NF EN 206-1 décrit les bases d'un système qualité du producteur, elle fournit des critères statistiques de conformité et les règles d'évaluation. Le contrôle de conformité du béton vise à vérifier la conformité du béton avec les spécifications. Il est défini par:

- Un plan d'échantillonnage précisant le nombre et la fréquence minimale des prélèvements nécessaires aux essais de contrôle.
- Un plan d'essais de contrôle définissant les essais à effectuer.
- Des critères de conformité permettant d'exploiter les résultats des essais pour attester de la conformité.

L'échantillonnage et les essais de conformité doivent être effectués, soit sur chaque composition de béton prise individuellement, soit sur des familles de bétons dont la représentativité est établie. Une famille de béton est un groupe de compositions de béton pour lesquelles une relation fiable entre des propriétés pertinentes a été établie (règles de formulation et règles de passages entre les bétons composant la même famille). La notion de famille peut être élargie dans le cas de centrale faisant l'objet d'une certification du contrôle de production [38].

II.10 : Contrôle de production

La norme NF EN 206-1 décrit très précisément la nature, le type d'essai à réaliser, la fréquence minimale et l'objectif de ces contrôles et les critères de conformité, selon que la production fasse l'objet ou non d'une certification de production. Elle implique la mise en

œuvre par le producteur d'un système qualité comprenant la réalisation d'essais aux fréquences prescrites [38].

Tous les bétons doivent être soumis au contrôle de production sous la responsabilité du producteur. Le contrôle de production comprend toutes les mesures nécessaires pour maintenir le béton conforme aux exigences spécifiées. Il inclut :

- La sélection des matériaux.
- La formulation du béton.
- La production du béton.
- Les inspections et les essais.
- L'utilisation des résultats des essais sur les constituants, sur le béton frais et durci, et sur les équipements.
- Le cas échéant, il porte également sur l'inspection du matériel de transport du béton frais.
- Le contrôle de conformité.

Toutes les données se rapportant au contrôle de production doivent être enregistrées afin d'assurer une parfaite traçabilité de la production.

Les points de contrôles de production concernent :

- Les constituants : ciment, granulats, adjuvants, additions, eau. Des tolérances précises sur le dosage des constituants doivent être respectées.
- Le matériel de production : dispositif de stockage, matériel de pesage, distributeurs d'adjuvant, doseur d'eau, système de mesure en continu de la teneur en eau des sables, système de dosage, appareillage d'essai.

II.11. Exemple de désignation des bétons

La commande d'un béton coulé in situ, BPS ou BCP, doit impérativement comprendre les informations spécifiées dans l'article 6 de la norme.

II.11.1. Béton à Propriétés Spécifiées (BPS)

BPS NF EN 206-1 C30/37 XC1(F) D_{\max} 22,4 S2 C1 0.65

Cette désignation reprend dans l'ordre :

- Le type de béton : BPS.
- La conformité à la norme : NF EN 206-1.

- La classe de résistance à la compression: C 30/37.
- La classe d'exposition : XC1 (F).
- La dimension maximale des granulats: D_{\max} 22,4.
- La classe de consistance : S 2.
- La classe de teneur en chlorure : Cl 0,65.

II.11.2. Béton à Composition Prescrite (BCP)

Les informations minimales pour définir les BCP sont :

- La référence à la norme NF EN 206-1.
- Le dosage en ciment.
- Le type et la classe de résistance du ciment.
- Le rapport E/C ou la consistance du béton.
- La dimension maximale nominale des granulats ainsi que leur type, leur catégorie et leur teneur maximale en chlorures.
- Le cas échéant, le type, la quantité et l'origine des adjuvants et additions.

II.12. Conclusion

La norme NF EN 206-1 constitue une évolution importante dans la manière de prescrire, formuler, fabriquer et contrôler les bétons au service de la qualité et de la performance des bétons. Elle s'intègre dans un ensemble cohérent de normes.

Elle définit des exigences (de moyens) pour la durabilité des structures, prend en compte avec précision la notion de classes d'exposition, introduit les classes de résistance pour les bétons légers et de nouvelles classes de résistance du béton (jusqu'à 100 MPa), impose des exigences sévères sur les contrôles de fabrication, (volume de contrôle augmenté et critères de conformité renforcés) prend en compte des additions dans la détermination du rapport eau/ciment, précise la répartition des responsabilités entre le prescripteur, le producteur et l'utilisateur et le rôle de chaque intervenant, définit des dispositions relatives aux essais de conformité, à l'évaluation de la conformité, aux critères de conformité et aux essais d'identification.

Elle permet d'augmenter les performances du béton, de renforcer la régularité de ses caractéristiques, sa qualité et donc d'améliorer la durabilité des ouvrages.

Chapitre II : Cas d'étude des classes d'exposition

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons choisi 3 structures différentes ayant des propriétés d'application courante pour le béton selon la norme NF EN 206-1. Pour assurer la durabilité et la résistance au béton de la durée de la vie sur le site à réaliser ce projet.

Nous allons étudier dans ce chapitre la composition du béton normal. Pour cela la méthode dite « Dreux- Gorisse » est utilisée. Cette méthode, pratique et simple, a pour but de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition d'un béton en fonction des qualités souhaitées et des matériaux utilisés. Toutefois, il faut noter que seules quelques gâchées d'essai et de confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement.

Les performances requises pour un béton impliquent :

- L'ouvrabilité du béton, généralement définit par l'affaissement au cône d'Abrams.
- La résistance du béton, le plus souvent à 28 jours.
- La durabilité qui conduit à imposer un dosage minimum en ciment et rapport E/C maximum.

Aussi, la formulation du béton doit permettre de respecter les deux premières exigences au moindre coût, le plus souvent donc à partir d'un dosage en ciment le plus faible possible.

III.2. Contexte de la formulation d'un béton ordinaire

La formulation d'un béton se fait en lien avec une opération de construction. Nous nous placerons dans le cadre de la formulation d'un matériau allant servir à fabriquer des éléments structurels à l'intérieur d'un futur bâtiment d'habitation de combinaison des classes d'exposition de la norme (norme NF-EN-206/CN) (voir la figure III.1).

Nous avons pris deux éléments de la première structure (voir la figure III.2) sont :

- 1- Voile extérieur protégé de l'humidité.
- 2-Fondation.

Les caractéristiques visées pour le béton ordinaire dans l'objectif de réalisation des éléments de base à l'intérieur et extérieur d'un bâtiment en béton armés (figure III.2) sont :

- Résistance caractéristique en compression sur cylindre à 28 jours : $f_{ck} = 25$ MPa béton de classe C25/30) et $f_{ck} = 35$ MPa (béton de classe 35/45).
- Consistance recherchée pour la mise en œuvre : béton plastique vibré normalement avec un affaissement visé de l'ordre de 8 cm et 9 cm successivement. (voir « Annexe

: Essai au cône »).

Les caractéristiques des matériaux à disposition sont :

- Pour première élément ce type d'ouvrage, un ciment de type CPJ-CEM II, un ciment de classe 32.5 convient.
- Pour deuxième élément ce type d'ouvrage, un ciment de type CPJ-CEM II A ayant par prudence la caractéristique ES convient.
- Analyse granulométrique de sables et des deux graviers (7/15 et 15/25) de la région de Biskra.
- Sables roulés propres, de bonne qualité, Le sable que nous avons utilisé provient de la région de Biskra (rivière d'Oued-Djedi) $\rho_s = 2600 \text{ Kg/m}^3$
- 2 gravillons roulés propres, de bonne qualité, de masse volumique absolue $\rho_g = 2600 \text{ Kg/m}^3$.
- Les courbes granulométriques des gravillons et de sable et sont (figure III.10 et III.11).

III.2.1 Les règles de formulation

La norme NF EN 206/CN définit:

En fonction d'une classe d'exposition, donc des contraintes que va subir le béton pendant sa durée de vie d 25 ans.

Des paramètres de composition:

Dosage minimum en ciment ou en liant équivalent et rapport maximal E efficace/C ou liant eq, en fonction de la taille maximale du granulat et une résistance en compression minimale + éventuellement d'autres paramètres spécifiques. Qui vont paramètre au béton de fonctionner pendant 25 ans dans cet environnement (protection armatures acier, gel/dégel,...etc).

Choix de la classe d'exposition depend de la responsabilité du client- prescripteur telle que présente sous la (figure III.1 et figure III.3, figure III.5) suivante :

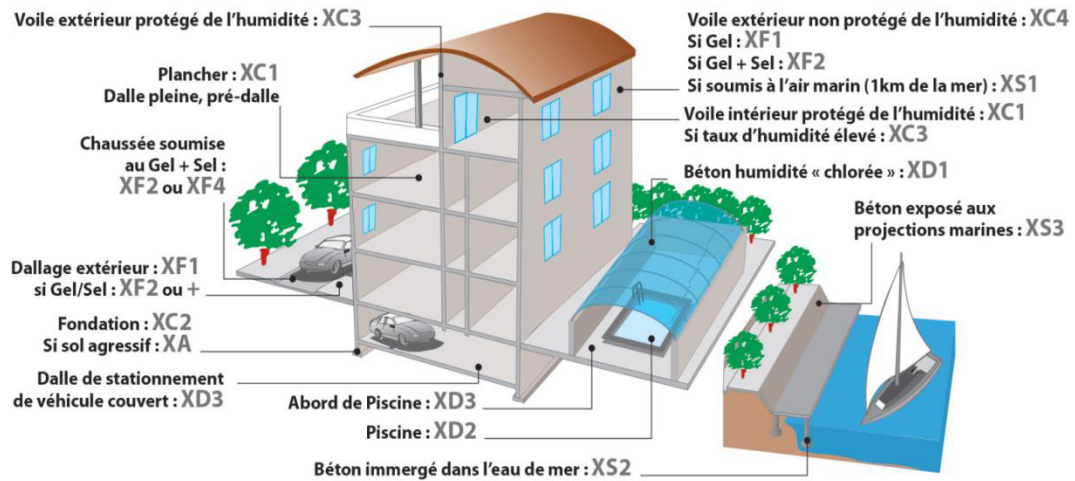


Figure III.1: Combinaison des classes d'exposition de la norme NF EN 206-1.

La norme NF EN 206-1 spécifie les caractéristiques spécifiques liées à la catégorie d'exposition pour chaque élément, telle que présente sous la figures (III.2 et III.4, III.6) suivant :

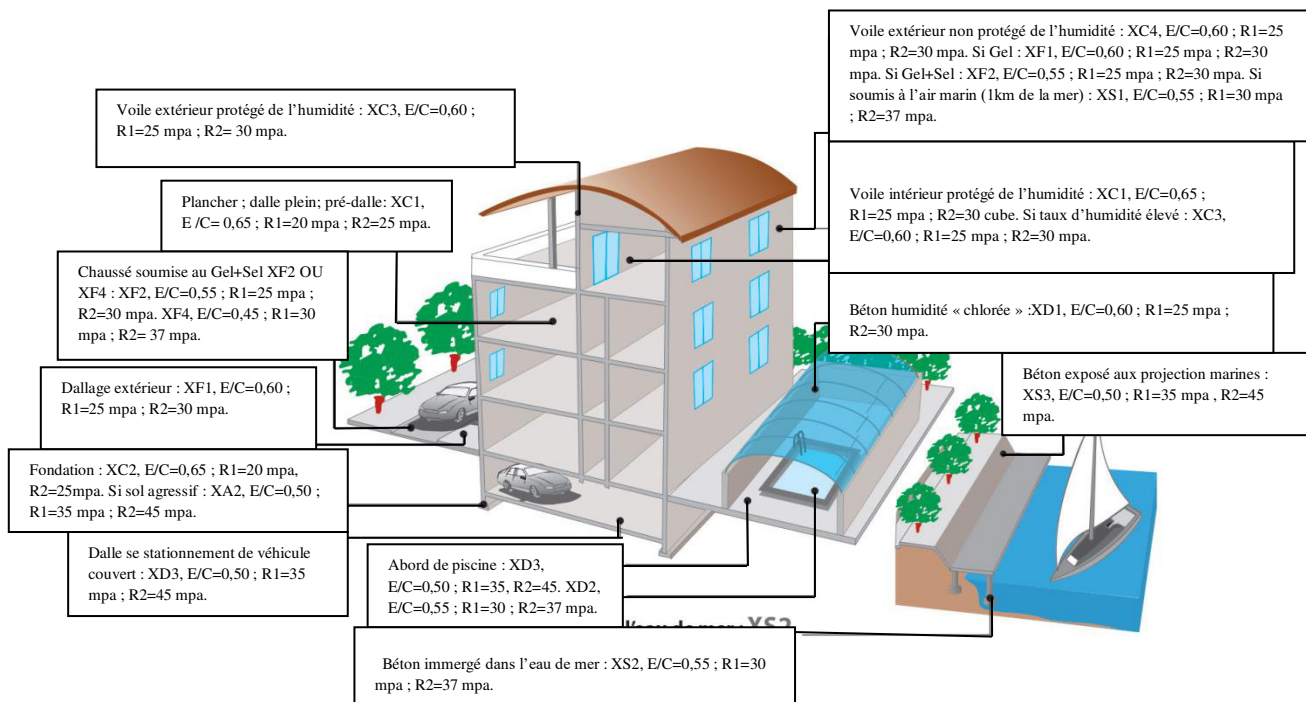


Figure III.2: Classes d'exposition dans le bâtiment 1 avec certaines caractéristiques d'applications courantes.

Ces valeurs sont déterminées en fonction de la classe d'exposition dans le bâtiment 1 avec certaines caractéristiques d'applications courantes selon le contexte normatif de la norme NF EN 206-1 où on a abouti aux différents résultats représentés ci-dessous dans le tableau suivant :

<i>Elément</i>	<i>Classe d'exposition</i>	<i>Rapport E_{eff} / liant éq maximal</i>	<i>Classe de résistance mini</i>	<i>Teneur mini en liant éq (kg/m^3)</i>
<i>Voile extérieur protégé de l'humidité</i>	<i>XC3</i>	<i>0,60</i>	<i>C25/30</i>	<i>280</i>
<i>Plancher ; dalle plein; pré-dalle</i>	<i>XC1</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>
<i>Chaussé soumise au Gel+Sel</i>	<i>XF2</i>	<i>0,55</i>	<i>C25/30</i>	<i>300</i>
	<i>XF4</i>	<i>0,45</i>	<i>C30/37</i>	<i>340</i>
<i>Dallage extérieur</i>	<i>XF1</i>	<i>0,60</i>	<i>C25/30</i>	<i>280</i>
<i>Fondation</i>	<i>XC2</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>
<i>Sol agressif</i>	<i>XA2</i>	<i>0,50</i>	<i>C35/45</i>	<i>350</i>
<i>Dalle de stationnement de véhicule couvert</i>	<i>XD3</i>	<i>0,50</i>	<i>C35/45</i>	<i>350</i>
<i>Abord de piscine</i>	<i>XD3</i>	<i>0,50</i>	<i>C35/45</i>	<i>350</i>
<i>Béton immergé dans l'eau de mer</i>	<i>XS2</i>	<i>0,55</i>	<i>C30/37</i>	<i>350</i>
<i>Béton exposé à la projection marine</i>	<i>XS3</i>	<i>0,50</i>	<i>C35/45</i>	<i>350</i>
<i>Voile extérieur non protégé de l'humidité</i>	<i>XC4</i>	<i>0,60</i>	<i>C25/30</i>	<i>280</i>
	<i>XF1</i>	<i>0,60</i>	<i>C25/30</i>	<i>280</i>
	<i>XF2</i>	<i>0,60</i>	<i>C25/30</i>	<i>280</i>

	<i>XS1</i>	<i>0,55</i>	<i>C30/37</i>	<i>350</i>
--	------------	-------------	---------------	------------

Tab III.1 : Valeurs limites spécifiques applicables d'un ouvrage à la composition et aux propriétés du béton.

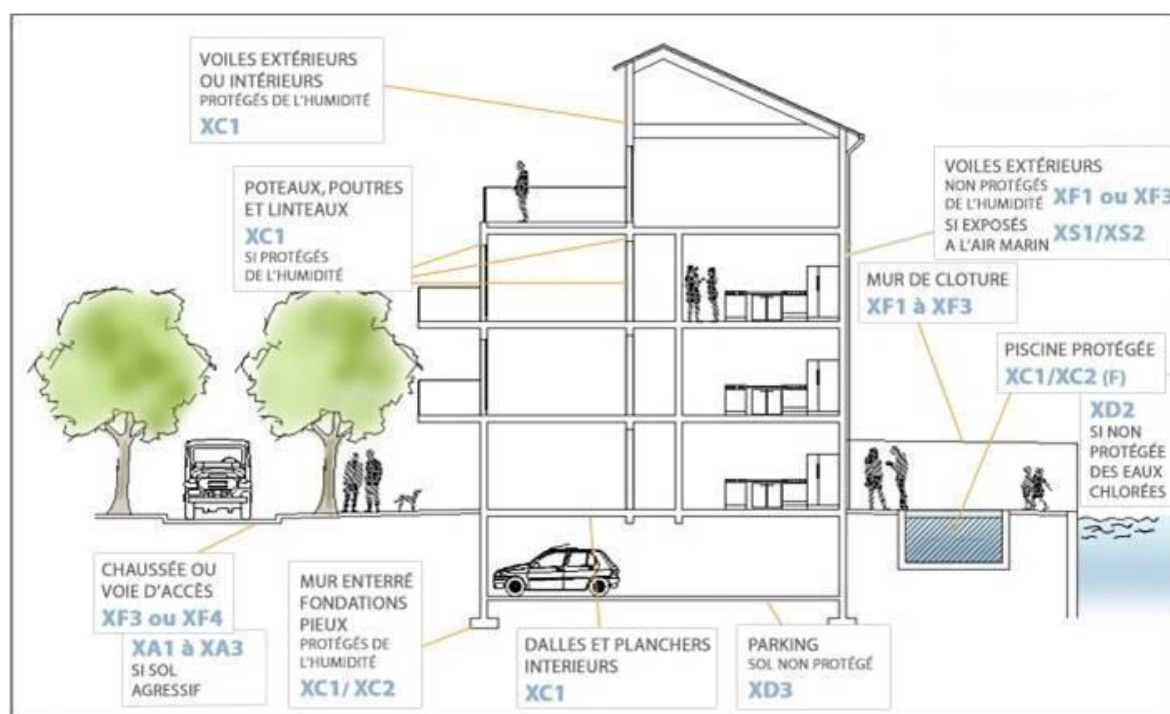


Figure III.3: Combinaison des classes d'exposition de la norme NF EN 206-1.

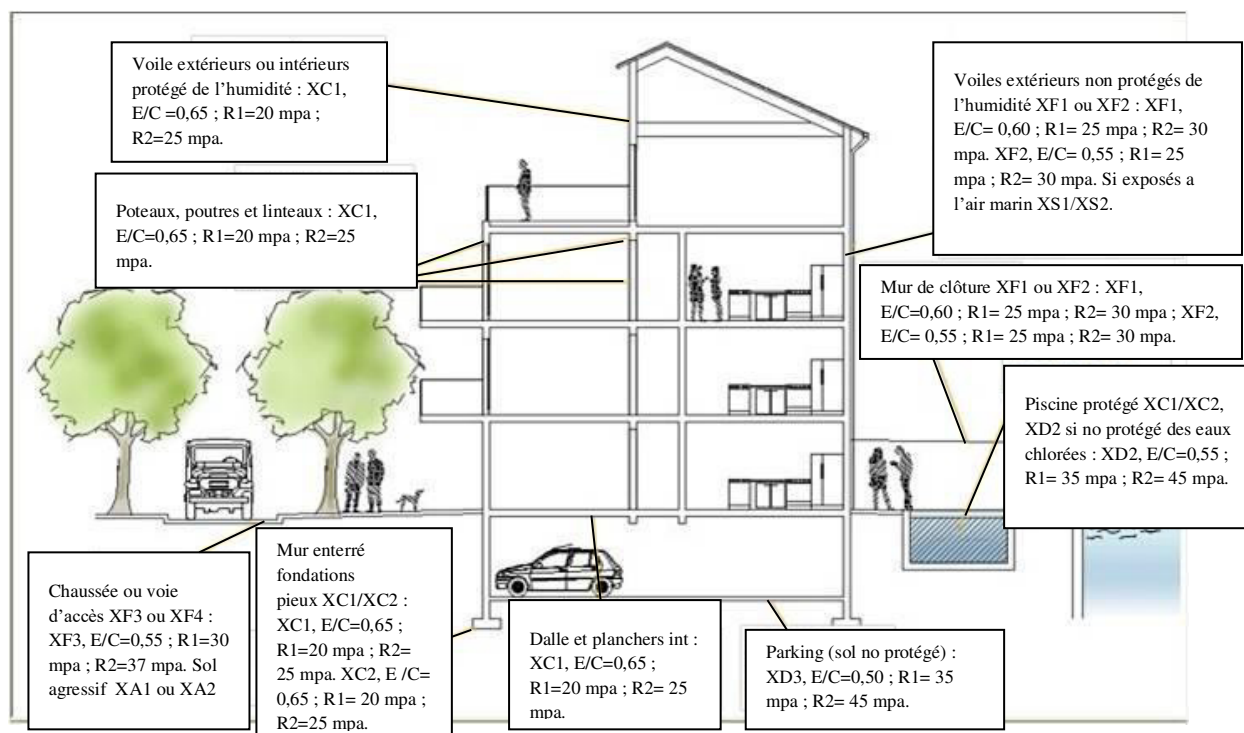


Figure III.4: Classes d'exposition dans le bâtiment 2 avec certaines caractéristiques d'applications courantes.

Ces valeurs sont déterminées en fonction de la classe d'exposition dans le bâtiment 2 avec certains caractéristiques d'application courantes selon le contexte normatif de la norme NF EN 206-1 où on a abouti aux différents résultats représentés ci-dessous dans le tableau suivant:

<i>Elément</i>	<i>Classe d'exposition</i>	<i>Rapport E_{eff} / liant éq maximal</i>	<i>Classe de résistance mini</i>	<i>Teneur mini en liant éq (kg/m^3)</i>
<i>Voile extérieurs ou intérieurs protégé de l'humidité</i>	<i>XC1</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>
<i>Poteaux, poutres et linteaux</i>	<i>XC1</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>
<i>Chaussée ou voie d'accès</i>	<i>XF3</i>	<i>0,55</i>	<i>C25/30</i>	<i>300</i>
	<i>XF4</i>	<i>0,45</i>	<i>C30/37</i>	<i>340</i>
<i>Mur enterré fondations pieux</i>	<i>XC1</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>
	<i>XC2</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>

Dalle et planchers int	XC1	0,65	C20/25	260
Parking (sol no protégé)	XD3	0,50	C30/35	350
Piscine protégé. Sinon protégé des eaux chlorées	XC1	0,65	C20/25	260
	XC2	0,65	C20/25	260
	XD2	0,55	C35/45	330
Mur de clôture	XF1	0,60	C25/30	280
	XF2	0,55	C25/30	300
Voiles extérieurs non protégés de l'humidité. Si exposés à l'air marin XS1/XS2	XF1	0,60	C25/30	280
	XF2	0,55	C25/30	300
	XS1	0,55	C30/37	330
	XS2	0,55	C30/37	330

Tab III.2 : Valeurs limites spécifiques applicables d'un ouvrage à la composition et aux propriétés du béton.

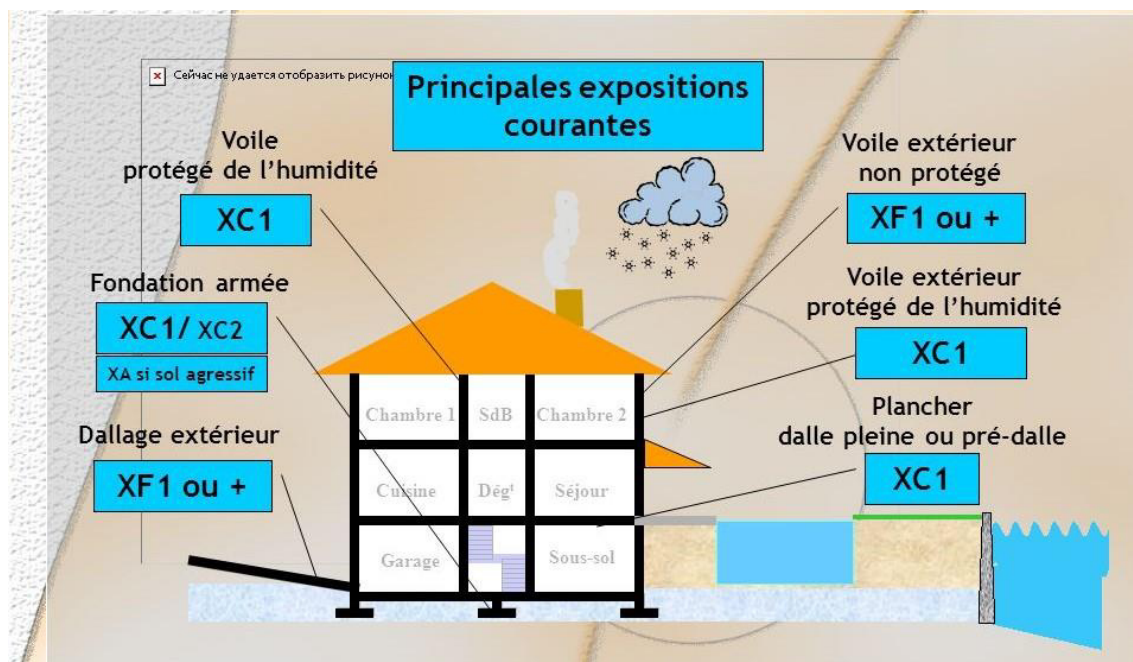


Figure III.5: Combinaison des classes d'exposition de la norme NF EN 206-1.

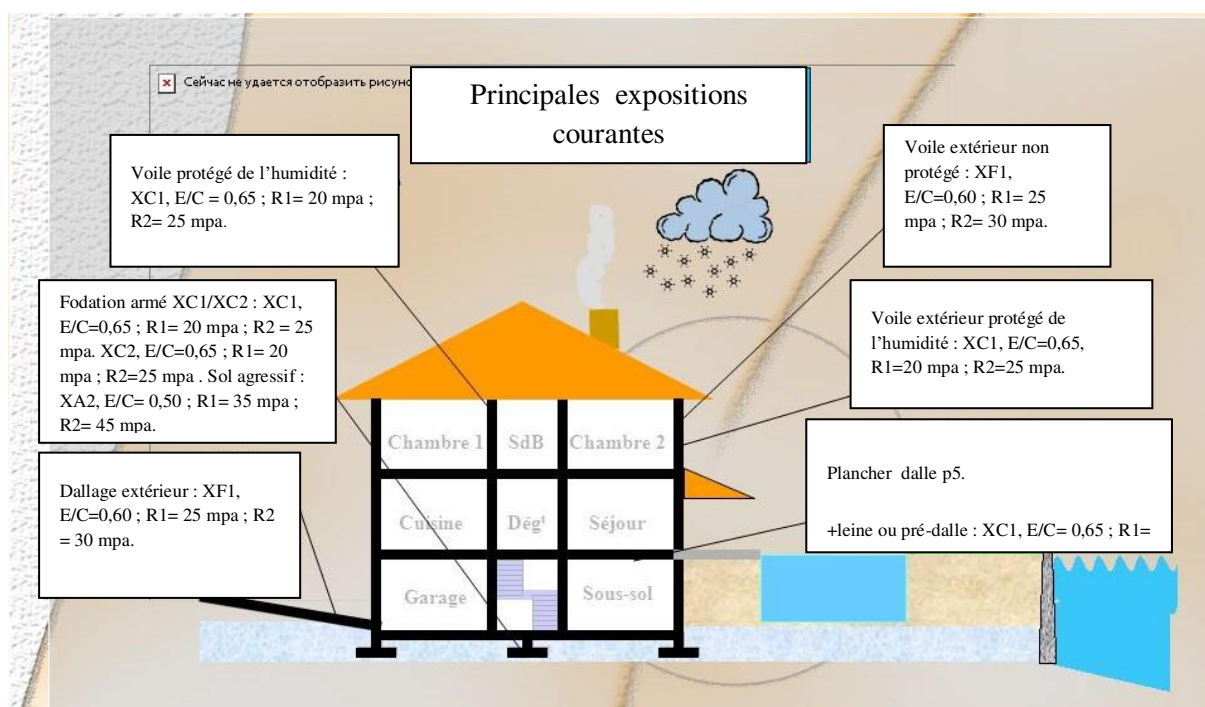


Figure III.6: Classes d'exposition dans le bâtiment 3 avec certaines caractéristiques d'applications courantes.

Ces valeurs sont déterminées en fonction de la classe d'exposition dans le bâtiment 3 avec certaines caractéristiques d'applications courantes selon le contexte normatif de la norme NF EN 206-1 où on a abouti aux différents résultats représentés ci-dessous dans le tableau suivant :

<i>Elément</i>	<i>Classe d'exposition</i>	<i>Rapport E_{eff} / liant ϵ_q maximal</i>	<i>Classe de résistance mini</i>	<i>Teneur mini en liant ϵ_q (kg/m^3)</i>
<i>Voile protégé de l'humidité</i>	<i>XC1</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>
<i>Fondation armé</i>	<i>XC1</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>
<i>Sol agressif</i>	<i>XA2</i>	<i>0,50</i>	<i>C35/45</i>	<i>350</i>
<i>Dallage extérieur</i>	<i>XF1</i>	<i>0,60</i>	<i>C25/30</i>	<i>280</i>

<i>Voile extérieur non protégé</i>	<i>XF1</i>	<i>0,60</i>	<i>C25/30</i>	<i>280</i>
<i>Voile extérieur protégé de l'humidité</i>	<i>XC1</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>
<i>Plancher dalle pleine ou pré-dalle</i>	<i>XC1</i>	<i>0,65</i>	<i>C20/25</i>	<i>260</i>

Tab III.3 : Valeurs limites spécifiques applicables d'un ouvrage à la composition et aux propriétés du béton.

III.3. Les méthodes de formulation du béton

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206/CN, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée dans la formule. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante de ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats.

D'autres exigences de la norme NF EN 206/CN imposent l'emploi de ciment particuliers en raison de milieux plus ou moins agressifs, ainsi que l'addition d'adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment que ce soit le délai de mise en œuvre, la plasticité, la quantité d'air occlus, etc.

Dans la littérature on trouve plusieurs méthodes de composition de béton .On peut situer :

- Méthode de Bolomey.
- Méthode de Faury.
- Méthode d'Abrams.
- Méthode Américaine.
- Méthode Britannique.
- Méthode de **Dreux-Gorisse**.

III.3.1. Choix d'une méthode de formulation

Le choix de la méthode de formulation s'est fait en fonction des critères suivants :

- Une méthode assez simple et facile à utiliser.
- C'est une méthode appliquée au niveau des laboratoires de l'est algérien comme ceux du C.T.C.Est, le L.T.P.Est et autres laboratoires privés
- Pour pouvoir comparer les résultats à ceux des autres organismes de contrôle.

Donc on travaillera avec la méthode Dreux – Gorisse.

III.3.2. Définition du cahier des charges

Déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis par le cahier des charges, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G en kg/m³).

III.4. Méthodes de calcul de la composition du béton selon Dreux Gorisse

III.4.1. Données de base

A) Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferrailé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferrillées : distance minimale entre elles et couvertures par rapport au coffrage.

B) Résistance souhaité

On générale on demande une résistance en compression à 28 jours « f_{c28} ». Si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre de 15%, on pourra adopter la règle approximative pour la résistance moyenne à viser :

$$f_c \approx f_{c28} + 15\% \dots\dots\dots \text{III.1}$$

C) Consistance désirée

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins

ferraillé), de la difficulté de bétonnage, des moyens de serrage. Elle est définie, en générale, par l'affaissement au cône comme indiqué dans le tableau III.4 :

<i>Plasticité</i>	<i>Serrage</i>	<i>Affaissement « A » en cm</i>
<i>Béton très ferme</i>	<i>Vibration puissante</i>	<i>0 à 2</i>
<i>Béton ferme</i>	<i>Bonne vibration</i>	<i>3 à 5</i>
<i>Béton plastique</i>	<i>Vibration courante</i>	<i>6 à 9</i>
<i>Béton mou</i>	<i>Piquage</i>	<i>10 à 13</i>
<i>Béton liquid</i>	<i>Léger piquage</i>	<i>≥ 14</i>

Tab III.4 : Consistance du béton

III.4.2. Dimension maximale des granulats « D »

Elle est fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner « coffrage, ferrailage.... ». Les valeurs de D sont données au tableau III.5.

<i>Caractéristiques de la pièce à bétonner</i>	<i>Dimension maximale des granulats</i>	
	<i>Roulés</i>	<i>Concassés</i>
<i>e (espacement horizontale entre armatures)</i>	$\leq 0,9 e$	$\leq 0,8 e$
<i>c (couverture)</i>	$\leq 0,8 c$	$\leq 0,7 c$
<i>r (rayon moyen du ferrailage)</i>	$\leq 1,8 r$	$\leq 1,6 r$
<i>R (rayon moyen du moule)</i>	$\leq 1,2 R$	$\leq R$
<i>hm (épaisseur minimale)</i>	$\leq hm /4$	$\leq hm /4$

Tab III.5 : Evaluation de « D »

III.4.3. Dosage en ciment

On commence par évaluer le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée f_c .

$$f_c = G \times f_{CE} \times (C/E - 0,5) \dots \dots \dots \text{III.2}$$

Avec :

f_c : résistance moyenne en compression désirée à 28 jours.

f_{CE} : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa.

C : dosage en ciment en (kg/m³).

E : Dosage en eau totale sur matériaux secs (litre/m³).

G : coefficient granulaire (tableau III.6).

Qualité des granulats	Dimension « D » des granulats		
	Fins ($D \leq 16 \text{ mm}$)	Moyens ($20 \leq D \leq 40 \text{ mm}$)	Gros ($D \geq 50 \text{ mm}$)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Tab III.6 : valeur approximatives du coefficient granulaire « G »

Le dosage en ciment est en fonction de C/E, mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure n°1 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée au problème.

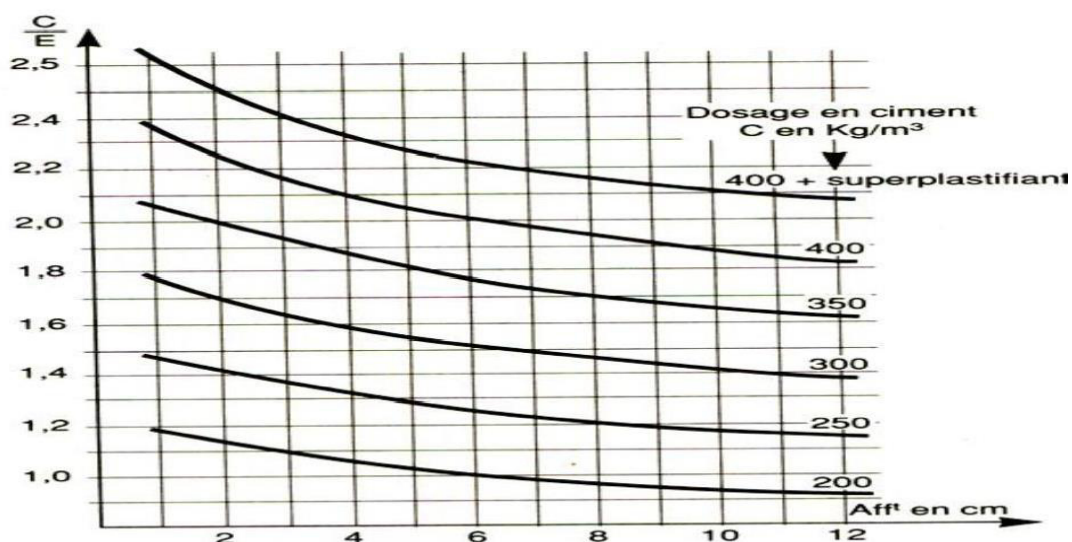


Figure III.7: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

III.4.4. Dosage en eau

L'abaque de la figure III.2, donne l'allure générale de la variation du dosage en eau en fonction de l'affaissement au cône et du test d'ouvrabilité C.E.S. Il ne s'agit bien entendu que d'ordre de grandeur pour des bétons courants et permettant de dégrossir rapidement une formule de composition mais comme pour tous les facteurs de cette composition c'est à notre avis par des essais sur des éprouvettes que les divers éléments constitutifs, et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement

dosée.

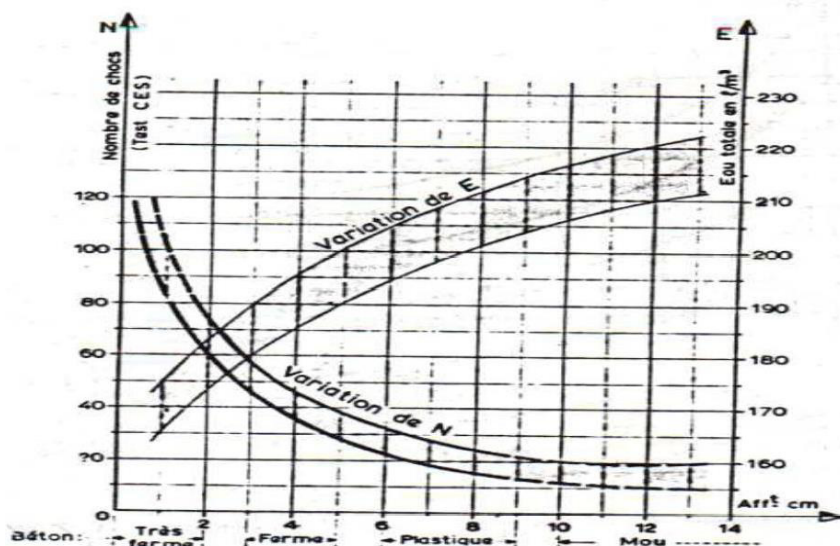


Figure III.8 : Variation relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de choc du test d'ouvrabilité C.E.S. en fonction de l'affaissement

III.4.4.1. Correction du dosage en eau en fonction de Dmax

Les données précédentes sont plus particulièrement applicables aux bétons dont la dimension maximale des granulats est d'environ $D = 25$ mm (dimension la plus courante). Si l'on a $D < 25$ mm, la surface spécifique des granulats augmente et à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice-versa.

La correction sur le dosage en eau correspond à $D = 25$ mm, peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau (III.7) en fonction de D.

<i>Dimension maximale des granulats « D » (mm)</i>	5	10	16	25	40	63	100
<i>Correction sur E (%)</i>	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Tab III.7 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale des granulats.

III.4.4.2. Dosage en eau réelle

La quantité d'eau totale (sur matériau supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, en obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant l'eau d'apport (contenue dans les granulats).

III.4.5. Dosage des granulats

III.4.5.1. Tracé de la courbe granulométrique de référence

Elle doit être tracée sur une feuille d'analyse granulométrique (papier semi-logarithmique). Le ciment n'est pas inclus dans la courbe. Celle-ci est composée de deux segments OA et AB avec brisure en A.

➤ **Abscisse X du point de brisure**

$D/2$ si $D \leq 25\text{mm}$. Si $D > 25\text{mm}$, « A » se projette au milieu du segment limité par le module 38 (6,3mm passoire) et le module correspondant à « D ».

➤ **Ordonnée Y du point de brisure**

Le pourcentage Y des tamis cumulatifs est :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K \dots \dots \dots \text{III.3}$$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de la forme des granulats, de la puissance de serrage et de la finesse de sable, comme le montre le tableau III.8.

<i>Vibration</i>		<i>Faible</i>		<i>Normale</i>		<i>Puissance</i>	
		<i>Roulé</i>	<i>Concassé</i>	<i>Roulé</i>	<i>Concassé</i>	<i>Roulé</i>	<i>Concassé</i>
<i>Forme des granulats (du sable en particulier)</i>							
<i>Dosage en ciment (Kg/m³)</i>	<i>400+fluidifiant</i>	-2	0	-4	-2	-6	-4
	<i>400</i>	0	+2	-2	0	-4	-2
	<i>350</i>	+2	+4	0	+2	-2	0
	<i>300</i>	+4	+6	+2	+4	0	+2
	<i>250</i>	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	<i>200</i>	+8	+10	+6	+8	+4	+6
<p>➤ Si $MF \neq 2,5 \rightarrow$ Correction supplémentaire $K_s = 6 MF - 15$.</p> <p>➤ Pour un béton pompable \rightarrow Correction supplémentaire $K_p = +5$ à $+10$.</p>							

Tab III.8 : Valeurs du terme correcteur K.

III.4.6. Volume total des granulats

Le volume total des granulats par unité de volume de béton frais est fourni par le tableau III.9, qui indique la valeur du coefficient de compacité γ_c .

Consistance	Mode de serrage	<i>c</i> coefficient de compacité						
		D= 5	D= 10	D= 12,5	D= 20	D=31,5	D= 50	D= 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Pour gravier concassé, diminuer γ_c de : 0,03.

Tab III.9 : Valeurs du coefficient de compacité γ_c

- Le coefficient de compacité γ_c est le rapport du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) par unité de volume de béton frais.
- Le volume absolu de l'ensemble des granulats est: $V = (1000 \gamma_c) - V_c$III.4
- Le volume absolu des grains de ciment : $V_c = \frac{C}{\gamma_c}$ et $\gamma_c = 3,1 \text{ g/cm}^3$.

III.4.7. Proportions des divers granulats

Les proportions des différents granulats sont déterminées graphiquement, en représentant les courbes granulométriques des granulats utilisés et la courbe de référence OAB définie précédemment et les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier au point de 5% de la courbe du granulat suivante.

III.5. Formulation du béton ordinaire

❖ Partie 1

III.5.1. Résistance visée

Pour appliquer cette formule, sélectionnez le premier élément du figure III.1

- **Voile extérieur protégé de l'humidité**

➤ **Classe d'exposition : XC3**

La résistance désirée pour un béton ordinaire à 28 jours est de l'ordre de :

$\sigma_{28j} = 25 \text{ MPa}$ La résistance visée est telle que : $\sigma'_{28j} = 1,15 \cdot \sigma_{28j}$, soit :

$$\sigma'_{28j} = (1,15) \cdot 25 = 28,75 \text{ Mpa}$$

III.5.2. Dosage en ciment et eau

A) Dosage en ciment par m³ de béton

Pour ce type d'ouvrage, un ciment de type CPJ-CEM II, un ciment de classe 32.5 convient.

On détermine le rapport C/E en utilisant la formule III.2

La formule III.2 ci-dessous permet de calculer la résistance à la compression visée à 28 jours, soit:

$$f_c = G \times f_{cE} \times (C/E - 0,5)$$

A.1) Choix approprié du coefficient granulaire G

A partir le tableau III.3 on prend $G=0,5$ car les granulats utilisés ont un diamètre inférieur à 40 mm et supérieur a 25mm, avec une bonne qualité.

$f_c' = \sigma'_{28j}$ résistance visée à 28 jours donc : $f_c' = 28,75 \text{ MPa}$

$$f_c = G \times f_{cE} \times (C/E - 0,5) \longrightarrow \frac{C}{E} = \frac{28,75}{0,5 \times 48} + 0,5 = 1,69$$

Donc: $\frac{C}{E} = 1,69$, Connaissant le rapport $\frac{C}{E}$ et l'affaissement au cône d'ABRAMS

souhaité A, on déduit, grâce à l'abaque, $\frac{C}{E}$ en fonction de A figure III.1, le dosage en ciment C, correspondant:

$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} \\ A=8\text{cm} \end{array} \right\} \longrightarrow \text{L'abaque donne la valeur du dosage en ciment : } C=350 \text{ kg/m}^3$

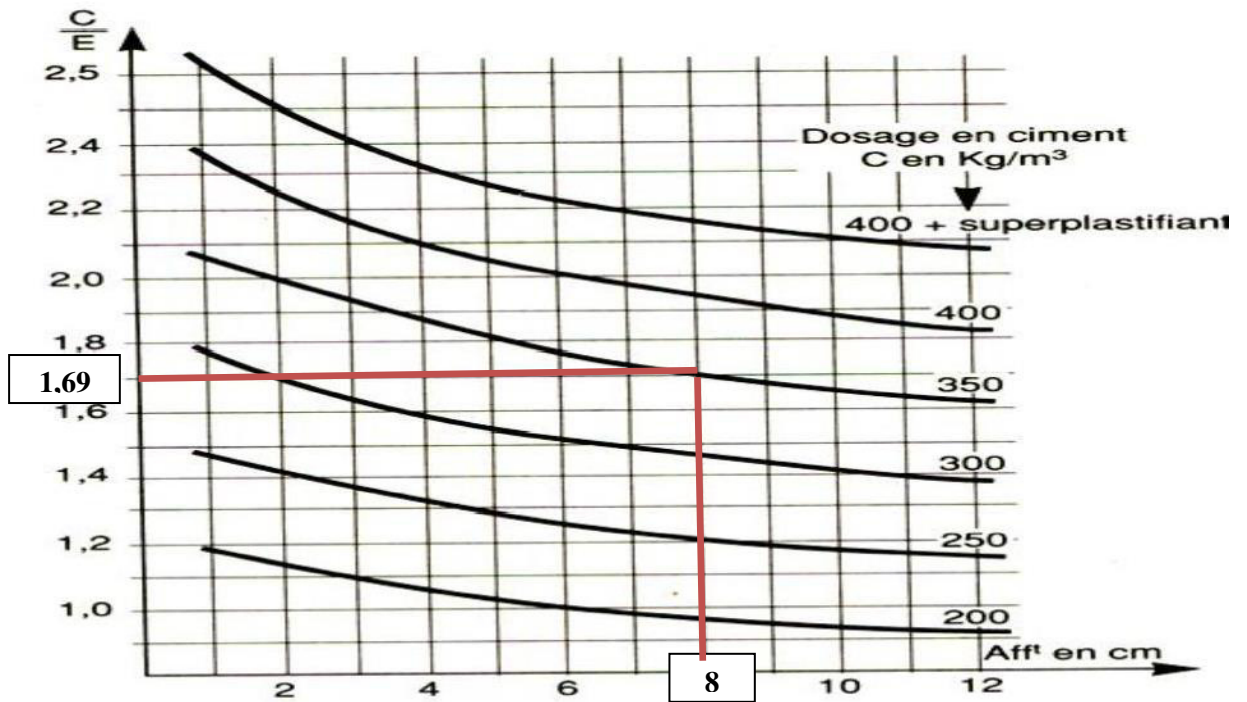


Figure III.9: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

b) Dosage en eau par m3 de béton

$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} \\ C= 350 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right\} \longrightarrow \text{On en déduit la valeur de E qui est: } E=207 \text{ kg/m}^3$

III.5.3. Détermination des pourcentages des granulats

III.5.3.1. Granulat (7/15,15/25)

Des pierres concassées de la région de Biskra.

Les propriétés telle que la masse volumique absolue des granulats, la masse volumique apparente, le coefficient de Los Angeles, la densité des granulats saturée superficiellement sec (γ_{SSS}), le coefficient d'absorption et l'analyse granulométrique sont donnés au tableau III.10.

Ouvertures des mailles (mm)	Refus partiel (%)		Refus cumulé (%)		Tamisât (%)	
	7/15	15/25	7/15	15/25	7/15	15/25
25.00	0.00	100	0.00	0.00	100	100
20.00	0.00	15.00	0.00	15.00	100	85.00
16.00	2.40	55.50	2.40	70.50	97.60	29.50
12.50	61.70	25.74	64.10	81.24	35.90	18.76
10.00	20.14	16.96	84.24	98.20	15.76	4.80
8.00	12.16	0.82	96.40	99.02	3.60	0.98
6.30	2.58	0.78	98.98	99.80	1.02	0.20
5.00	0.5	0.19	99.48	99.99	0.52	0.01
Le font	0.46	0.00	99.94	99.99	0.06	0.01

Tab III.10 : Analyse granulométrique de granulat

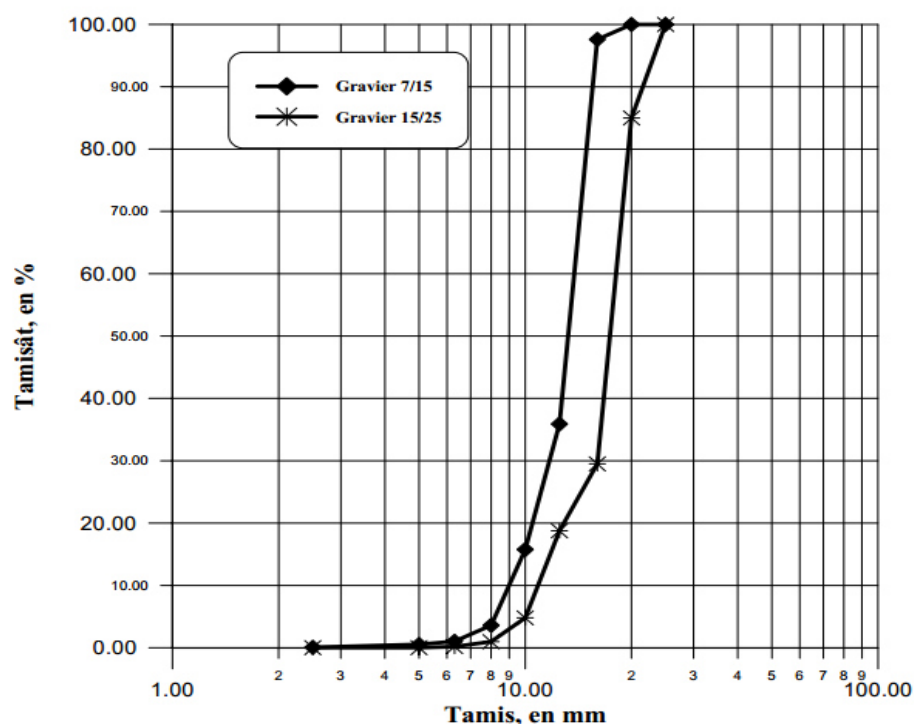


Figure III.10 : Courbe granulométrique du granulat

III.5.3.2. Sable

Le sable que nous avons utilisé provient de la région de Biskra (rivière d'Oued-Djedi). Ses propriétés et son analyse granulométrique sont donnés au tableau III.11.

<i>Ouvertures des mailles (mm)</i>	<i>Refus partiel (g)</i>	<i>Refus cumulé (g)</i>	<i>Refus cumuli (%)</i>	<i>Tamisât (%)</i>
5.000	0.00	0.00	0.00	100
2.500	227.00	227.00	11.35	88.65
1.250	218.00	445.00	22.25	77.75
0.630	607.00	1052.00	52.60	47.40
0.315	602.00	1654.00	82.60	17.40
0.160	138.00	1792.00	89.60	10.40
0.080	196.00	1988.00	99.30	0.70
Fond	11.00	1999.00	99.90	0.10

Tabl III.11: Analyse granulométrique du sable

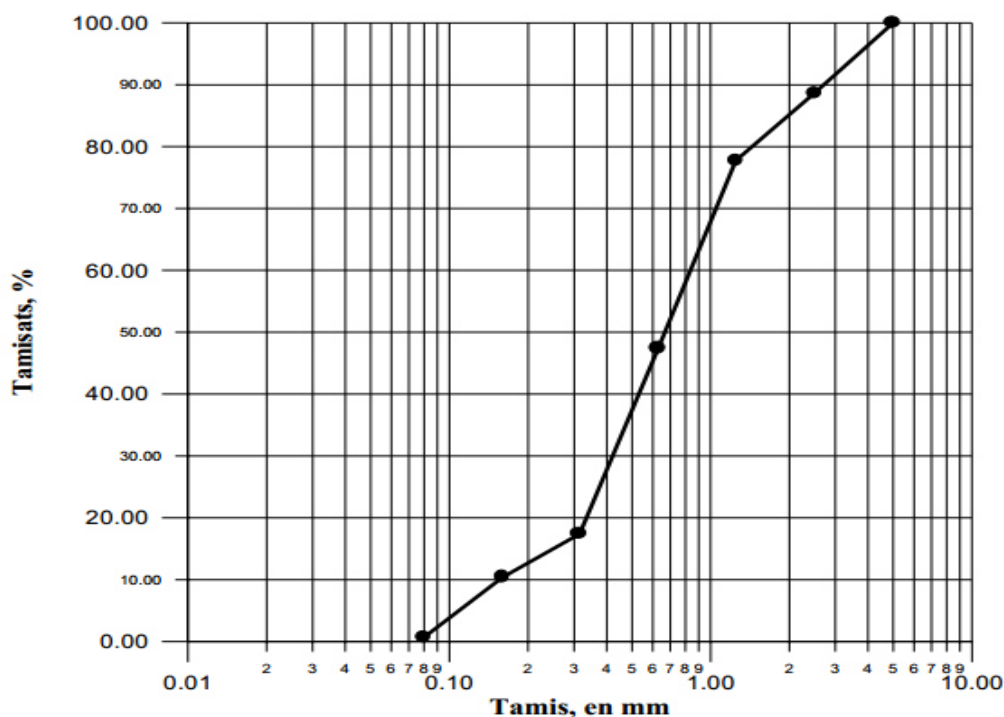


Figure III.11: Courbe granulométrique du sable

❖ Tracé de la courbe granulaire de référence AOB

Nous traçons une courbe de référence OAB avec:

- Le point O est repéré par ses coordonnées: [0.08; 0]
- Le point B est repéré par ses coordonnées: [D; 100], (D: le diamètre du plus gros granulat). Le point de brisure A aux coordonnées suivantes:

En abscisse :

- Le plus gros granulat est $D = 25\text{mm}$, donc le point de brisure a pour abscisse: $A = D/2 = 12,5\text{mm}$.

En ordonnée : $Y = 50 - \sqrt{D} + K$

Pour $C = 350 \text{ Kg/m}^3$; Vibration normale ; Sable concassé on trouve : $K = +1$, on lui ajoute une correction supplémentaire K_s : si $MF \neq 2,5 \rightarrow K_s = (6 MF - 15) = (6 \times 2,8 - 15) = (16,8 - 15) = 1,8$
 $\rightarrow K_s = 1,8$
 $\rightarrow K = 1,8 + 1 = 2,8$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure A sont: (12,5 ; 47,8).

III.5.3.3. La ligne de partage

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5%, de la courbe granulaire du plus gros granulat. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et gravier. Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamis correspondant à ce point d'intersection. Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier.

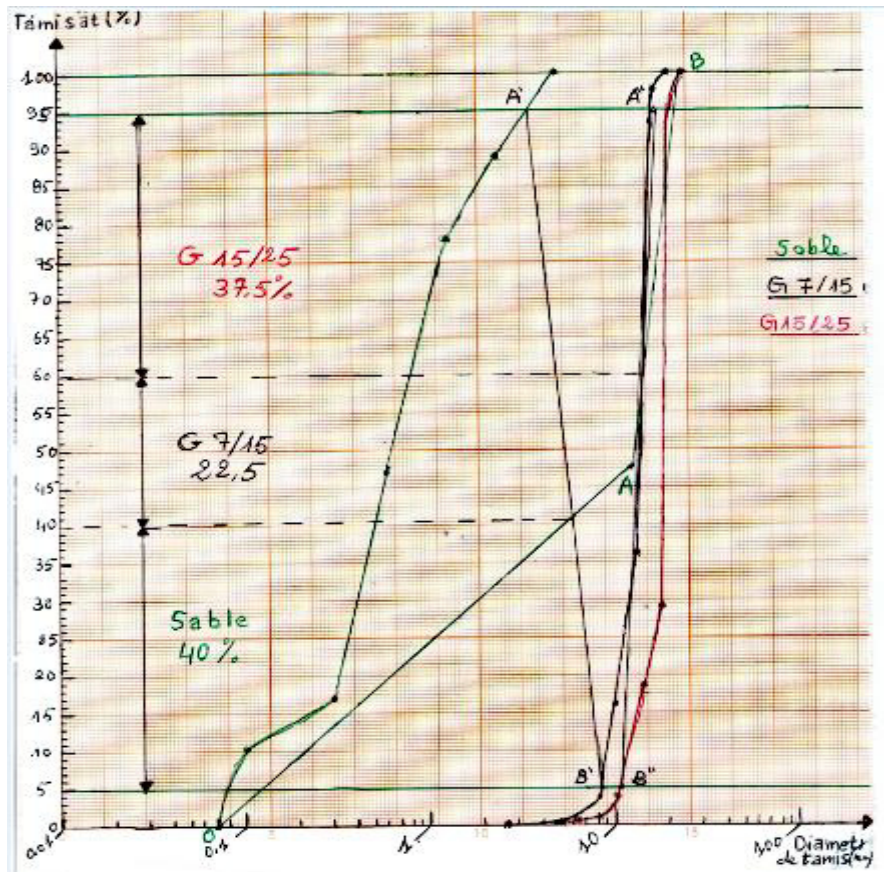


Figure III.12 : courbe granulométrique de référence (Dreux-Gorisse)

On obtient donc un mélange optimal avec un volume absolu de 40 % de sable optimale et 60 % de gravier (Gravier 7/15: 22,5 % + Gravier 15/25: 37,5 %). Sur la courbe granulométrie, les points d'intersection entre les lignes de partage et la courbe OAB donnent les pourcentages des granulats suivants :

- Sable optimale : 40 %.
- Gravier 7/15 : 22,5 %.
- Gravier 15/25 : 37,5 %.

III.5.4. Coefficient de compacité

Il est défini comme le rapport des volumes absolus en litres des matières solides :

$$V_M = V_S + V_G + V_C \dots \dots \dots \text{III.5}$$

Au volume total du béton frais soit un mètre cube :

$$\gamma_c = \frac{VM}{1000} \dots \dots \dots \text{III.6}$$

En utilisant le tableau III.6 des valeurs du coefficient de compacité et après interpolation pour un diamètre maximum de granulats égal à 25 mm, on trouve une valeur de $\gamma_c = 0,827$.

Volumes absolus des constituants solides sont :

- Le volume totale absolu : $1000\gamma = 827 \text{ l/m}^3$
- Le volume absolu du ciment : $(350/3,1) = 113 \text{ l/m}^3$.
- Le volume absolu des granulats : $827-113 = 714 \text{ l/m}^3$.
- Le volume absolu du gravier 7/15 : $V_{G1} = 714 \times (22,5/100) = 160,65 \text{ l/m}^3$.
- Le volume absolu du gravier 15/25 : $V_{G2} = 714 \times (37,5/100) = 264,18 \text{ l/m}^3$.
- Le volume absolu du sable : $V_S = 714 \times (40/100) = 285,6 \text{ l/m}^3$.

Connaissions les masses volumiques absolues des granulats :

- Gravier 7/15 = $160,65 \times 2,6 = 417,69 \text{ Kg/m}^3$
- Gravier 15/25 = $264,18 \times 2,6 = 686,87 \text{ Kg/m}^3$
- Sable = $285,61 \times 2,59 = 739,73 \text{ Kg/m}^3$

<i>Constituants</i>	<i>Le volume (l/m³)</i>
<i>Sable</i>	<i>285,6</i>
<i>Gravier 7/15</i>	<i>160,65</i>
<i>Gravier 15/25</i>	<i>264,18</i>
<i>Ciment</i>	<i>113</i>

Tab III.12: Le volume des composants

<i>Constituants</i>	<i>La masse (Kg/m³)</i>
<i>Sable</i>	<i>739,73</i>
<i>Gravier 7/15</i>	<i>417,69</i>
<i>Gravier 15/25</i>	<i>686,87</i>
<i>Ciment</i>	<i>350</i>

Tab III.13: Les composants en masse

Pour préparer 1m³ de béton, il faudra donc les masses représenté dans le tableau III.14.

<i>Composants</i>	<i>Quantité</i>
<i>Ciment</i>	<i>350 Kg/m³</i>
<i>Sable</i>	<i>739,73 Kg/m³</i>
<i>Gravier 7/15</i>	<i>417,69 Kg/m³</i>

<i>Gravier 15/25</i>	<i>686,87 Kg/m³</i>
<i>Eau</i>	<i>207 litre /m³</i>
<i>Rapport E/C</i>	<i>0,60</i>

Tab III.14: Composition d'un mètre cube du béton

❖ Partie 2

III.5.5. Résistance visée

Pour appliquez cette formule, sélectionnez le deuxième élément du figure III.1

- **Fondation**

- **Classe d'exposition : si sol agressif XA2**

La résistance désirée pour un béton ordinaire à 28 jours est de l'ordre de :

$\sigma_{28j} = 35$ MPa La résistance visée est telle que: $\sigma'_{28j} = 1,15 \cdot \sigma_{28j}$, soit :

$$\sigma'_{28j} = (1,15) \cdot 35 = 40,25 \text{ MPa.}$$

III.5.6. Dosage en ciment et eau

A) Dosage en ciment par m³ de béton

Formulation d'un béton pour des puits de fondations non armées en milieu non acide.

Pour ce type d'ouvrage, un ciment de type CPJ-CEM II A ayant par prudence la caractéristique ES convient.

Par ailleurs, les faibles contraintes auxquelles sont soumis ces ouvrages ne nécessitent pas la recherche de classes élevées de ciment. Ainsi un ciment de classe 32,5 convient.

On détermine le rapport C/E en utilisant la formule III.2

La formule III.2 ci-dessous permet de calculé la résistance à la compression visée à 28 jours, soit:

$$f_c = G \times f_{cE} \times (C/E - 0,5)$$

A.1) Choix approprié du coefficient granulaire G

A partir le tableau III.3 on prend $G=0,5$ car les granulats utilisés ont un diamètre inférieur à 40 mm et supérieur a 25mm, avec une bonne qualité.

$f_c' = \sigma'_{28}$; résistance visée à 28 jours donc : $f_c' = 40,25$ MPa

$$f_c = G \times f_{cE} \times (C/E - 0,5) \longrightarrow \frac{C}{E} = \frac{40,25}{0,5 \times 48} + 0,5 = 2,17$$

Donc: $\frac{C}{E} = 2,17$

Connaissant le rapport $\frac{C}{E}$ et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A, on déduit,

grâce à l'abaque, $\frac{C}{E}$ en fonction de A figure III.1, le dosage en ciment C, correspondant:

$\frac{C}{E}$ } → L'abaque donne la valeur du dosage en ciment : $C = 400 \text{ kg/m}^3$
 A = 9cm }

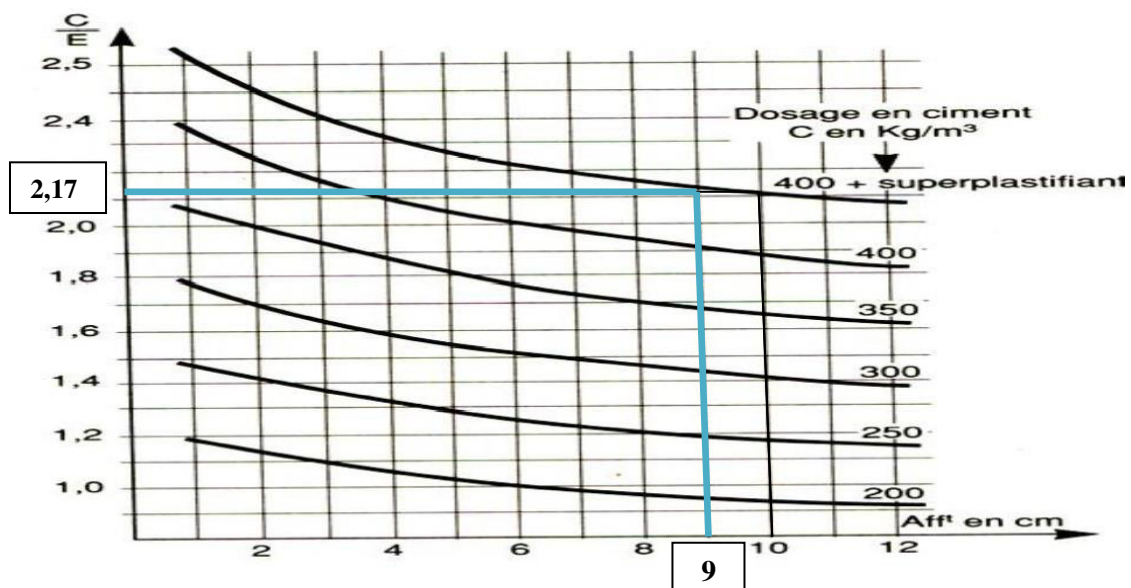


Figure III.13: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

B) Dosage en eau par m³ de béton

$\frac{C}{E}$ } → On en déduit la valeur de E qui est: $E = 184,3 \text{ kg/m}^3$
 C = 400 kg/m^3 }

III.5.7. Détermination des pourcentages des granulats

III.5.7.1 Granulat (7/15,15/25)

Des pierres concassées de la région de Biskra.

Les propriétés telle que la masse volumique absolue des granulats , la masse volumique apparente, le coefficient de Los Angeles, la densité des granulats saturée superficiellement sec (γ_{sss}), le coefficient d'absorption et l'analyse granulométrique sont donnés au tableau III.7.

III.5.7.2. Sable

Le sable que nous avons utilisé provient de la région de Biskra (rivière d'Oued-Djedi). Ses propriétés et son analyse granulométrique sont donnés au tableau III.8.

III.5.8. Détermination des pourcentages des granulats

III.5.8.1. Tracé de la courbe granulaire de référence

Tracé de la courbe granulaire de référence OAB (le même la courbe granulaire de référence dans figure III.2).

III.5.9. Coefficient de compacité

On a :

$$\gamma_c = 0,827.$$

Volumes absolus des constituants solides sont :

- Le volume totale absolu : $1000\gamma = 827 \text{ l/m}^3$
- Le volume absolu du ciment : $(400/3,1) = 129 \text{ l/m}^3$.
- Le volume absolu des granulats : $827-129 = 698 \text{ l/m}^3$.
- Le volume absolu du gravier 7/15 : $V_{G1} = 698 \times (22,5/100) = 157,05 \text{ l/m}^3$.
- Le volume absolu du gravier 15/25 : $V_{G2} = 698 \times (37,5/100) = 261,75 \text{ l/m}^3$.
- Le volume absolu du sable : $V_S = 698 \times (40/100) = 279,2 \text{ l/m}^3$.

Connaissons les masses volumiques absolues des granulats :

- Gravier 7/15 = $157,05 \times 2,6 = 408,25 \text{ Kg/m}^3$

- Gravier 15/25 = $261,75 \times 2,6 = 696,15 \text{ Kg/m}^3$
- Sable = $279,2 \times 2,59 = 723,13 \text{ Kg/m}^3$

<i>Constituants</i>	<i>Le volume (l/m³)</i>
<i>Sable</i>	<i>279,2</i>
<i>Gravier 7/15</i>	<i>157,05</i>
<i>Gravier 15/25</i>	<i>261,75</i>
<i>Ciment</i>	<i>129</i>

Tab III.15: Le volume des composants

<i>Constituants</i>	<i>La masse (Kg/m³)</i>
<i>Sable</i>	<i>723,13</i>
<i>Gravier 7/15</i>	<i>408,25</i>
<i>Gravier 15/25</i>	<i>696,15</i>
<i>Ciment</i>	<i>400</i>

Tab III.16: Les composants en masse

Pour préparer 1m³ de béton, il faudra donc les masses représenté dans le tableau III.17.

<i>Composants</i>	<i>Quantité</i>
<i>Ciment</i>	<i>400 Kg/m³</i>
<i>Sable</i>	<i>723,13 Kg/m³</i>
<i>Gravier 7/15</i>	<i>408,25 Kg/m³</i>
<i>Gravier 15/25</i>	<i>696,15 Kg/m³</i>
<i>Eau</i>	<i>184,3 litre /m³</i>
<i>Rapport E/C</i>	<i>0,50</i>

Tab III.17: Composition d'un mètre cube du béton

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la méthode de formulation de béton selon de la norme NF EN 206-1, nous avons abordé la méthode de Dreux- Gorisse, une méthode assez simple et facile à utiliser, ainsi que la détermination de la composition d'un mètre cube de béton ordinaire. La résistance mécanique à 28 jours et l'affaissement de notre béton ordinaire correspondent aux objectifs visés (affaissement 8 cm et 9 cm, résistance à la compression à 28 jours de 25 MPa et 35 MPa).

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail consiste principalement en recherche et étude sur la norme NF EN 206-1, qui constitue le texte de base pour prescrire, formuler, fabriquer et contrôler les bétons. Elle s'intègre dans un ensemble cohérent de normes.

Elle définit des exigences pour la durabilité des structures, prend en compte avec précision la notion de classes d'exposition, impose des exigences sévères sur les contrôles de fabrication, précise la répartition des responsabilités entre le prescripteur, le producteur et l'utilisateur et le rôle de chaque intervenant, définit des dispositions relatives aux essais de conformité, à l'évaluation de la conformité, aux critères de conformité et aux essais d'identification.

Elle permet de maîtriser les propriétés du béton, de renforcer la régularité de ses caractéristiques, et donc d'améliorer ses performances et sa qualité au service de la durabilité des ouvrages.

Nous avons résumé cela dans notre travail, cette norme présente des avancées importantes :

- ✓ Elle favorise la sécurité et la fiabilité des bétons produits, par l'augmentation des contrôles et l'augmentation de la résistance moyenne.
- ✓ Elle favorise une meilleure durabilité des ouvrages, en définissant 18 classes d'exposition.
- ✓ Elle assure la clarté et la transparence sur les résistances.
- ✓ Etudes et contrôles pour les centrales de chantier.
- ✓ Le client-prescripteur est responsable du choix de la classe d'exposition.
- ✓ 100% des bétons se réfèrent à la norme : BPS-BCP
- ✓ Pour un même bâtiment, XC1 convient pour un grand nombre de bétons (fondations, intérieur et extérieur protégé de l'humidité).
- ✓ Meilleure prise en compte de la classe d'exposition des ouvrages.
- ✓ La norme NF EN 206-1 optimise la qualité des bétons.
- ✓ La méthode de formulation de Dreux-Gorisse s'avère très intéressante pour la recherche de telles formulations.
- ✓ La résistance mécanique à 28 jours des bétons élaborés augmentent avec la diminution du

rapport E/C et l'augmentation du dosage en ciment. En effet, l'hydratation qui a pour effet de colmater les capillaires (les pores) existants et renforcer les liaisons inter granulaires.

Enfin, on espère avoir atteint notre objectif et que notre contribution a ouvert d'autres perspectives de recherche dans le domaine de la durabilité de béton en vue d'un développement durable dans le domaine des ouvrages d'arts.

Références Bibliographiques

[1] : **Tania CROSTON, (06- 2006)**, « Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparés par matériaux composites », thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, centre de Bordeaux, France.

[2] : **Notice n° PM 08-01, (04- 2008)**, « Guide d'utilisation du béton en site maritime », Centre d'Etudes techniques maritimes et fluviales, ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, France.

[3] : **Véronique NOBEL PUJOL - LESUEUR, (05-02- 2004)**, « Etude du mécanisme d'action du monofluorophosphate de sodium comme inhibiteur de la corrosion des armatures métalliques dans le béton », thèse de doctorat, université Paris 6, université pierre et marie curie - spécialité génie des procédés et haute technologie.

[4] : **J.-P. Balayssac, V. Kringkaï, M. Sbartai, G.Klysz, S. Laurens, G. Arliguie, (05-2007)**, « Contribution au développement du radar pour la caractérisation non destructive du béton », 25e rencontres de l'AUGC, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), INSA – UPS Génie Civil, 135 avenue de Rangueil, F-31077 TOULOUSE Cedex 04, France.

[5] : **Dreux and Festa, 1998; de Larrard, 2000**

[6] : **Mathieu CHEKROUN, (29-11-2008)**, « Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence », thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, Sciences Pour l'Ingénieur Géosciences Architecture.

[7] : **TACHE, (1994)**, « Durabilité des armatures du béton armé et précontraint », enquête IREX.

[8] : **NDZANA AKONGO Grégoire, TCHOUMI Samuel**, « Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures », DIPET2 (Diplôme des Professeurs des lycées d'Enseignement Technique 2ème grade), Génie Civil, Option: Bâtiment et Travaux, Université de Douala (Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique) ENSET.

[9] : **BAROGHEL-BOUNY (V.), CHAUSSADENT (T.), CROQUETTE (G.), DIVET (L.), GAWSEWITCH (J.), GODIN (J.), HENRY (D.), PLATRET (G.) et VILLAIN (G.)** – Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons – Méthodes de mesure et d'essais de laboratoire – Méthodes d'essai N° 58. Techniques et Méthodes des LPC, LCPC, 88 p., fév. 200

[10] : **Y.F.HOUST** ; « carbonatation du béton et corrosion des armatures chantiers/suisse » ; 1989 ; 15 (6) :569-574.

[11] : **M.THEIRY** ; « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires - prise en compte des effets cinétique et des modifications microstructurales et hydrique » ; thèse de doctorat soutenue en 2005 ; LCPC.

- [12] : **K. TUUTTI** ; « corrosion of steel in concrete »; research institute; Stockholum; 1982.
- [13] : **Roger. LACROIX, Jean LUC CLEMENT** ; « Propriétés des bétons armés et précontraintes » ; Lavoisier ; 2002.
- [14]. **E-G .SWENSON** et **P-J.SEREDA** ; “Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement”; J. appl. chem.; 1968 p 18: 111-117.
- [15] : **A. NEVILLE** ;”consideration of durability of concrete structures: past, present and future materials and structures”; 2001; p 34:144-188.
- [16] : **Y-H. LOO, M-S.CHIN,C-T.TAM** et **K-C-G.ONG** ; « A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete magazine of concrete research “ ;1994; p191-200.
- [17] : **M.VENUAT** et **J.ALEXANDRE** ; ”carbonation du béton”; partie II; revue des matériaux de construction;1968; (639):469-481.
- [18] : **Bureau de normalisation** NBN EN 13369 Règles communes pour les produits préfabriqués en béton. Bruxelles, NBN, 2004.
- [19] : **Bureau de normalisation** NBN EN 206-1 Béton. Partie 1: spécifications, performances, production et conformité. Bruxelles, NBN, 2001.
- [20] : **Comité européen de normalisation** prEN 13670 Execution of concrete structures. Bruxelles, CEN, 2007.
- [21] : **Bureau de normalisation** NBN EN 1992-1-1 Eurocode 2 : calcul des structures en béton. Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments. Bruxelles, NBN, 2005.
- [22] : **Bureau de normalisation** NBN B 15-001 Supplément à la NBN EN 206-1. Bruxelles, NBN, 2004.
- [23] : **André ORCESI, (11- 2008)**, « Etude de la performance des réseaux d’ouvrages d’art et détermination des stratégies de gestion optimales », thèse de doctorat, l’Université Paris-Est.
- [24] : **DAIAN (J.F.)** et **MADJOUR (N.)**. – Diffusion de sels dans les matériaux humides. Analyse des processus couplés et étude expérimentale, in « Transferts dans les bétons et durabilité ». Numéro double spécial de la Revue Française de Génie Civil, (Ed. by V. Baroghel-Bouny, Hermès Science Publications, Paris), vol. 5, no 2-3, pp 331-355 (2001).
- [25] : **BAROGHEL-BOUNY (V.)**. – Which toolkit for durability evaluation as regards chloride ingress into concrete? Part II : Development of a performance approach based on durability indicators and monitoring parameters, in Proceedings of the 3rd RILEM Workshop « Testing and modelling chloride ingress into concrete », Madrid, Spain (Ed. by C. Andrade and J. Kropp, RILEM Publ., Cachan, 2002), 9-10 sept. 2002.

[26] : **BAROGHEL-BOUNY (V.) et al.** – Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – État de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité. Documents Scientifiques et Techniques de l'Association Française de Génie Civil, AFGC, Bagnaux, 252 p., juil. 2004.

[27] : **BAROGHEL-BOUNY (V.), GAWSEWITCH (J.), BELIN (P.), OUNOUGH (K.), ARNAUD (S.), OLIVIER (G.) et BISSONNETTE (B.)**. – Vieillessement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI e siècle. IV – Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 249, pp 49-100, mars-avr. 2004.

[28] : **BIGAS (J.P.), LAMBERT (F.) et OLLIVIER (J.P.)**. – Modélisation globale des interactions physico-chimiques régies par des isothermes non linéaires entre ions chlore emortier de ciment Portland. Materials and structures, vol. 29, pp 277-285 (1996).

[29] : **CAPRA (B.) et SELIER (A.)**. – Modélisation multiéchelles des réactions alcali-granulats. Actes de la Journée Scientifique AFGC-DRAST sur l'alcali-réaction, ESPCI, Paris, France, 21 oct. 1999.

[30] : **CASTELLOTE (M.), ANDRADE (C.) et ALONSO (C.)**. -Measurement of the steady and non-steady state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. Cement and concrete research, vol. 31, N° 10, pp 1411-1420 (2001).

[31] : **R.Lassoued, K. Ouchenane, M. Ouchenane, (25-11/26-11-2008)**, «Corrosion des armatures dans le béton armé, Techniques de réparation et de réhabilitation», colloque National : Pathologie des Constructions : Du Diagnostic à la Réparation, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département de Génie Civil, université Mentouri Constantine, Algérie.

[32] : **Christian CREMONA, (2005)**, « Analyse de la performance des ouvrages existants : vers une approche basée sur la notion de cycle de vie », le vieillissement dans les centrales nucléaires, recueil de contribution. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58 boulevard Lefebvre, F75732 Paris Cedex 15, France.

[33] : **Emmanuel ROZIERE, (11-2007)**, « Etude d la durabilité des bétons par une approche performantielle », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes.

[34] : **EUROCODE, (1991)**, « Norme Européenne : Eurocode 1 : Bases de calculs et actions sur les structures », Partie 1 : Bases de Calcul, AFNOR, Avril 1996.

[35] : **L. KASSOUMI, M. AIT ELAAL, A. OUALI, R. ESSAMOUD A. GHAFIRI**, « Approche performantielle et prédictive de béton des ouvrages d'art sur la base d'indicateurs de durabilités », Département de Géologie, Faculté des sciences Ben M'sik, Université Hassan II – Mohammadia, Maroc.

[36] : **Association Française du Génie Civil, [AFGC], (06-2003)**, « Conception de bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion

des armatures et de l'alcali réaction », État de l'art et guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle sur la base d'indicateurs de durabilité.

[37] : Géraldine VILLAIN, Mickael THIERY, Gérard PLATRET, Jean Luc CLEMENT, (Submitted on 10 Jul 2009), « Application d'une démarche performantielle pour évaluer la durabilité du tablier d'un grand ouvrage d'art 15 ans après sa construction », HAL Id: hal-00350468 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00350468>.

[38] : NF EN 206-1- Béton – Partie 1 et 2 : Spécification, performances, production et conformité, par décision du Directeur Général d'AFNOR le 5 janvier 2002 pour prendre effet le 5 février 2002.

[39] : Généré par i-REEF – EDITION S 154 – DEC 2008, document : NF EN 1992-1-1/NA (mars 2007) :E.

Annexe

Tableau 1 : spécifications types, vis-à-vis de la prévention de la corrosion des armatures et l'alcali réaction, en fonction du type d'environnement

Durabilité potentielle vis-à-vis de la corrosion des armatures	Classes et valeurs limites				
	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Teneur en Ca(OH) ₂ (% par rapport au ciment)	< 10	10 - 13	13 - 20	22 - 25	≥ 25
Durabilité potentielle vis-à-vis de l'alcali-réaction	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Teneur en Ca(OH) ₂ (% par rapport au ciment)	≥ 20	13 - 17	8 - 12	5 - 8	< 5

Tableau 2 : Type d'environnement influençant la corrosion des armatures

	N°	Type d'environnement	Classes d'exposition correspondantes de l'EN 206-1 ou de la Pr EN 1992-1
Carbonatation	1	- Sec et très sec (HR < 65 %) - Humide en permanence (y compris immersion en eau douce)	X0 et XC1 (limités au climat sec)
	2	Humide, rarement sec (HR > 80 %)	XC2
	3	Humidité modérée (65 < HR < 80 %)	XC3
	4	Périodes d'humidité alternant avec des périodes sèches sans chlorure (sels de déverglaçage, embruns, ...)	XC4
Pénétration des chlorures	5	Exposition aux sels marins ou de déverglaçage, mais pas en contact direct avec l'eau de mer . 5.1 : [Cl ⁻] faible : concentration en chlorures libres à la surface $c_s \leq 10 \text{ g.L}^{-1}$. 5.2 : [Cl ⁻] forte : concentration en chlorures libres à la surface $c_s \geq 100 \text{ g.L}^{-1}$	XSI, XDI et XD3 ⁽¹⁾
	6	Immersion dans l'eau contenant des chlorures	XS2 et XD2
	7	Zone de marnage	XS3

(1) dans le cas XD3, les cycles de gel-dégel peuvent constituer un facteur aggravant pour le "béton d'enrobage" et de là pour la corrosion des armatures- Dans ce dernier cas, la classe XD3 correspondra au type d'environnement 5.2, ou éventuellement au type d'environnement 7.

Tableau 3 : Type d'environnement influençant l'alcali réaction


N°	Type d'environnement	Classes d'exposition correspondantes de l'EN 206-1 ou de la Pr EN 1992-1
1	- Sec et très sec - Humidité modérée avec peu d'alternances	X0 et XC1 (limités au climat sec)
2	Périodes d'humidité alternant avec des périodes sèches	X0 XC1, XC3, XC4 XD1, XD3, XS1, XS3 XF1, XF3
3	Immersion en eau douce ou de mer ou fortes doses de sels de déverglaçage	X0 XC1, XC2, XD2, XS2, XS3 XF2, XF4

Tableau 4 : Type d'environnement influençant l'attaque sulfatique


N°	Type d'environnement	Classes d'exposition correspondantes de l'EN 206-1
1	- Environnement à faible agressivité chimique	XA1
2	- Environnement d'agressivité chimique modérée	XA2
3	- Environnement à forte agressivité chimique	XA3


Tableau 5 : Indicateurs de durabilité sélectionnés et valeurs limites proposées en fonction du type d'environnement et de la durée de vie exigée

Type d'environnement → Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / Niveau d'exigence	Corrosion induite par carbonatation (e = 30 mm)				Corrosion induite par les chlorures (e = 50 mm)			
	1 Sec et très sec (HR<65%) ou humide en permanence	2 Humide (HR>80%)	3 Modérément humide (60<HR<80 %)	4 Cycles fréquents d'humidification- séchage	5 Exposition aux sels marins ou de déverglaçage		6 Immersion dans l'eau contenant de chlorures	7 Zone de marnage
					[CL] faible ⁽¹⁾	[CL] forte ⁽²⁾		
< 30 ans Niveau 1	• $P_{eau} < 16$	• $P_{eau} < 16$	• $P_{eau} < 15$	• $P_{eau} < 16$	• $P_{eau} < 16$	• $P_{eau} < 14$	• $P_{eau} < 15$	• $P_{eau} < 14$
De 30 à 50 ans Bâtiment Niveau 2	• $P_{eau} < 16$	• $P_{eau} < 16$	• $P_{eau} < 14^{(5)}$	• $P_{eau} < 14^{(6)}$	• $P_{eau} < 15$	• $P_{eau} < 11$	• $P_{eau} < 13$	• $P_{eau} < 11$
De 50 à 100 ans Bâtiment et Ouvrage d'art Niveau 3	• $P_{eau} < 14^{(6)}$	• $P_{eau} < 14^{(6)}$	• $P_{eau} < 12^{(7)}$ • $K_{gaz} < 100^{(8)}$	• $P_{eau} < 12^{(7)}$ • $K_{liq} < 0.1^{(9)}$	• $P_{eau} < 14$	• $P_{eau} < 11$ • $D_{app(mig)} < 2$ • $K_{liq} < 0.1^{(3)}$	• $P_{eau} < 13$ • $D_{app(mig)} < 7$	• $P_{eau} < 11$ • $D_{app(mig)} < 3$ • $K_{liq} < 0.1^{(3)}$
De 100 à 120 ans	• $P_{eau} < 12$ • $K_{gaz} <$	• $P_{eau} < 12$ • $K_{gaz} <$	• $P_{eau} < 9$ • $K_{gaz} <$	• $P_{eau} < 9$	• $P_{eau} < 12$ • $D_{app(mig)} <$	• $P_{eau} < 9$	• $P_{eau} < 12$	• $P_{eau} < 10$
Grands ouvrages Niveau 4	100	100	$10^{(4)}$	• $K_{gaz} < 10$ • $K_{liq} < 0.01$	20 • $K_{liq} < 0.1^{(3)}$	• $D_{app(mig)} < 1$ • $K_{gaz} < 10$ • $K_{liq} < 0.01$	• $D_{app(mig)} < 5$	• $D_{app(mig)} < 2$ • $K_{gaz} < 100$ • $K_{liq} < 0.05$
> 120 ans Ouvrages dites exceptionnels Niveau 5	• $P_{eau} < 9$ • $K_{gaz} < 10$	• $P_{eau} < 9$ • $K_{liq} < 0.01$	• $P_{eau} < 9$ • $K_{gaz} < 10$ • $K_{liq} < 0.01$	• $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 1$ • $K_{gaz} < 10$ • $K_{liq} < 0.01$	• $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 10$ • $K_{gaz} < 10$ • $K_{liq} < 0.01$	• $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 1$ • $K_{gaz} < 10$ • $K_{liq} < 0.01$	• $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 1$	• $P_{eau} < 9$ • $D_{app(mig)} < 1$ • $K_{gaz} < 10$ • $K_{liq} < 0.01$

 Durabilité potentielle faible

 Durabilité potentielle moyenne

 Durabilité potentielle élevée

 Durabilité potentielle très élevée

Avec :

D_{app} : Coefficient de diffusion apparent des chlorures ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

P_{eau} : Porosité accessible à l'eau (%)

K_{gaz} : Perméabilité au gaz (10^{-18} m^2)

K_{liq} : Perméabilité à l'eau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0.5}$)

- (1) : Concentration en chlorures libres à la surface $C_S \leq 10$ g/l
 (2) : Concentration en chlorures libres à la surface $C_S \geq 100$ g/l
 (3) : alternative : $K_{gaz} < 100 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
 (4) : alternative : $K_{liq} < 0.01 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
 (5) : alternative : $P < 15 \%$ et $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25 \%$
 (6) : alternative : $P < 16 \%$ et $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25 \%$
 (7) : alternative : $P < 14 \%$ et $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25 \%$
 (8) : alternative : $K_{gaz} < 300 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
 (9) : alternative : 1) $K_{gaz} < 100 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$
 2) $K_{gaz} < 300 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ et $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \geq 25$

Tableau 6 : Synthèse des classes et valeurs limites (indicatives) relatives aux indicateurs de durabilité généraux (G) ou de substitution (S)

	Durabilité potentielle	Classes et valeurs limites				
		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
G	Porosité accessible à l'eau (%) P_{eau}	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
S	Porosité mesurée par intrusion de mercure (%) P_{hg}		13 à 16	9 à 13	6 à 9	3 à 6
S	Résistivité électrique (Ohm.m) ρ	< 50	50 à 100	100 à 250	250 à 1000	> 1000
G	Coefficient de diffusion effectif des chlorures ($10^{-12} \text{ m}^2 ; \text{s}^{-1}$) D_{eff}	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
G	Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de migration) ($10^{-12} \text{ m}^2 ; \text{s}^{-1}$) $D_{app(mig)}$	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
G	Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de diffusion) ($10^{-12} \text{ m}^2 ; \text{s}^{-1}$) $D_{app(diff)}$				< 5	
G	Perméabilité apparente aux gaz (à $P_{entréeg}=2$ MPa et après séchage à $T = 105$ °C) (10^{-18} m^2) K_{gaz}	> 1000	300 à 1000	100 à 300	10 à 100	< 10
G	Perméabilité à l'eau liquide (à P_{max} par mesure directe de flux, après saturation) (10^{-18} m^2) K_{liq} (*)	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
	Type de béton (indicatif)		B25 à B35	B30 à B60	B55 à B80	> B80





	Durabilité potentielle faible		Durabilité potentielle moyenne
	Durabilité potentielle élevée		Durabilité potentielle très élevée

Tableau 7 : Synthèse des classes et valeurs limites (indicatives) relatives à la teneur en portlandite Ca(OH)_2

Durabilité potentielle vis-à-vis de la corrosion des armatures	Classes et valeurs limites				
	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Teneur en Ca(OH)_2 (% par rapport au ciment)	< 10	10 - 13	13 - 20	22 - 25	≥ 25
Durabilité potentielle vis-à-vis de l'alcali-réaction	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Teneur en Ca(OH)_2 (% par rapport au ciment)	≥ 20	13 - 17	8 - 12	5 - 8	< 5

Type d'environnement → Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / Niveau d'exigence ↓	1 (sec ou humidité modérée)	2 (cycles d'humidité séchage)	3 (immersion ou Présence de sols)
de 5 à 50 ans Ouvrages provisoires + la plupart des produits préfabriqués à l'exception des éléments de structure et des produits destinés à être utilisés dans des ambiances agressives comme les canalisations d'assainissement, les corniches d'OA, ... Niveau 1 (risque faible ou acceptable)	A	A	A
de 50 à 100 ans La plupart des bâtiments et ouvrages de génie civil Niveau 2 (risque peu tolérable)	A	B	B
> 120 ans (ou bien exigence d'absence de fissuration, même en cas de durée de vie plus courte, pour des raisons de	C	C	C

Tableau 8 : Détermination du niveau de prévention en fonction du type d'environnement

