



Projet National

Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton (PERFDUB)

Etude de montage (11/07/2014)



Etude pilotée par François CUSSIGH (VINCI Construction France), avec la co-animation de :

B. Thauvin (CETE de l'Ouest), P. Turcry (LaSIE) : thème « Carbonatation/Chlorures »

L. Izoret (ATILH), C. Clergue (Sigma Béton) et P. Vuillemin (HOLCIM): thème « Gel-Sels »

L. Divet (IFSTTAR) et F. Cassagnabère (LMDC) : thème « Attaques chimiques »

M. Carcassès (LMDC) et V. Baroghel-Bouny (IFSTTAR) : thème « Seuils admissibles »

E. Rozière (GEM) et P. Rougeau (CERIB): thème « Bétons de référence – Variabilité »

P. Gegout (Bouygues Construction), L. Linger (VINCI Construction Grands Projets) et J.M. Potier (SNBPE) : thème « Contractualisation de l'approche »

et l'aide de **B. Godart (IFSTTAR), M. Thiery (IFSTTAR) et F. Toutlemonde (IFSTTAR)**

Ce rapport d'étude de montage fait suite à l'étude de faisabilité présentée le 14 Octobre 2013 et validée par le RGC&U le 13 décembre 2013, il comprend en préambule des compléments apportés à l'étude de faisabilité concernant l'état de l'art à l'International d'une part et les impacts économiques, commerciaux et environnementaux d'autre part. Les réponses aux observations émises par le comité d'orientation du RGC&U concernant l'étude de faisabilité font l'objet de la note d'introduction associée au présent document.

Contenu

Contenu	2
1 Préambule.....	4
1.1 Etat de l'art international	4
1.2 Impacts économiques, commerciaux et environnementaux	4
2 Contexte et enjeux	5
3 Rappel des objectifs généraux et du champ de la recherche	7
4 Organisation du projet de recherche	8
4.1 Direction du projet.....	8
4.2 Groupes de travail.....	8
4.3 Comité de suivi international	8
5 Programme de recherche	9
5.1 Essais de durabilité (Thème 1).....	9
5.1.1 Contexte et objectifs.....	9
5.1.2 Principes généraux d'organisation	11
5.1.3 Essais relatifs à la carbonatation (GT1a).....	15
5.1.4 Essais relatifs à la pénétration des chlorures (GT1a)	17
5.1.5 Autres essais et indicateurs relatifs à la carbonatation et à la pénétration des chlorures	19
5.1.6 Essais relatifs au gel et aux sels de déverglaçage (GT1b)	21
5.1.7 Essais relatifs aux attaques chimiques externes (GT1c)	21
5.2 Seuils de performance admissibles (Thème 2).....	25
5.2.1 Introduction	25
5.2.2 Identification des paramètres de formulation et de confection prépondérants sur la durabilité des bétons.....	26
5.2.3 Calage des seuils sur ouvrages anciens et corps d'épreuve	28
5.2.4 Modélisation.....	33
5.3 Bétons à étudier – Bétons de référence (Thème 3 – première partie)	36
5.3.1 Introduction et objectifs	36
5.3.2 Gamme de formulations.....	36
5.3.3 Perspectives de recherche.....	37
5.4 Prise en compte de la variabilité (Thème 3 – deuxième partie)	38
5.4.1 Généralités	38
5.4.2 Variabilité spatiale et temporelle.....	39
5.4.3 Essais de contrôle.....	39
5.5 Contractualisation de l'approche (Thème 4).....	39
5.6 Valorisation des résultats (Thème 5).....	41
6 Partenaires potentiels	42
7 Budget global prévisionnel.....	43

8	Planning prévisionnel	44
9	Annexes	45
9.1	Annexe 1 : Synthèse des approches performantielles à l'International.....	45
9.1.1	Les différentes approches de type performantiel en Europe.....	45
9.1.2	Les différentes approches de type performantiel à l'internationale (hors europe)	50
9.2	Annexe 2 : Etat de l'art International – travaux de recherche en cours.....	53
9.2.1	Introduction	53
9.2.2	Les limites de l'approche prescriptive : les bétons modernes et les matériaux alternatifs.....	54
9.2.3	Les différentes méthodologies performantielles et leurs limites.....	55
9.2.4	Focus sur quelques approches	57
9.2.5	Bilan.....	59
9.2.6	Références	60
9.3	Annexe 3 : Proposition de la gamme de bétons à étudier (GT3)	69
9.3.1	Rapport E_{eff} /Liant éq.....	72
9.3.2	Dosage en liant équivalent et volume de pâte	72
9.3.3	Proportion et nature des additions minérales	72
9.3.4	Nature du ciment.....	72
9.3.5	Nature des granulats.....	72
9.4	Annexe 4 : Présentation du projet de recherche ANR « Modevie »	74
9.5	Annexe 5 : Projet de charte du PN PERFDUB	80

1 Préambule

1.1 Etat de l'art international

L'état de l'art international a été décrit aux chapitres 3, 4 et 5 de l'étude de faisabilité. Nous l'avons complété par une synthèse des différentes approches de type performantiel dans le Monde établie à partir du rapport « *Panorama à l'international des approches performantielles de la durabilité des bétons – Rapport CERIB 2014 – J. Mai-Nhu* ». Cette synthèse figure en annexe 1.

Pour ce qui concerne plus spécifiquement les travaux de recherche à l'International, une synthèse est également proposée en annexe 2.

1.2 Impacts économiques, commerciaux et environnementaux

Nous développons ci-après les éléments apportés au chapitre 1 de l'étude de faisabilité.

Un des objectifs majeurs de l'approche performantielle de la durabilité des bétons est d'utiliser autant que possible comme constituants du béton des matériaux locaux et ainsi limiter les distances de transport qui ont des impacts économiques et environnementaux négatifs. Les raisons pour lesquelles les matériaux locaux ne sont pas utilisés sont liées aux impératifs de qualité usuellement prescrits pour les constituants du béton et qui ont du sens dans la mesure où les performances du béton ne sont pas toutes mesurées (par exemple, on demande des granulats de code A pour des bétons exposés à une forte agressivité chimique). En l'absence de qualification performantielle du béton, les prescriptions de moyens habituelles portant sur la qualité des constituants sont utilisées pour qualifier le béton. Un des problèmes rencontrés par la profession est lié à la raréfaction des ressources en granulats de haute qualité, un autre concerne la difficulté de qualification de la résistance aux attaques chimiques des différents types de liant (ciment composé manufacturé ou ciment manufacturé couplé avec des additions). Ainsi, les règles habituelles portant sur les liants pour des bétons en milieu chimiquement agressif (y compris le milieu marin) et figurant dans le fascicule de documentation FD P18-011 peuvent être relaxées (voir §7.3 de ce fascicule) si le béton présente une compacité élevée (les exigences sur la « barrière chimique » peuvent être modulées en fonction de la qualité de la « barrière physique »). Il n'existe malheureusement à ce jour aucune méthode reconnue pour effectuer une telle relaxation de contrainte sur la qualité des constituants.

Dans le même esprit, la profession cherche à développer le recyclage du béton dans le béton et en particulier à remplacer les granulats naturels par des granulats de béton concassé. Les premiers résultats du Projet National Recybéton en cours montrent que les paramètres de durabilité de bétons ainsi constitués sont d'autant plus dégradés que le taux d'incorporation de ces granulats recyclés est élevé et les conclusions sur leurs possibilités d'emploi resteront forcément prudentes du fait de l'absence de critères performantiels bien établis. Sur ce point, le projet Perfdub se place comme un projet complémentaire du projet Recybéton.

De même, l'industrie cimentière, les producteurs et utilisateurs de béton cherchent à développer de nouveaux liants permettant de réduire l'impact environnemental des bétons du point de vue du facteur d'émission de CO₂. Avec soixante millions de mètres cubes mis en œuvre chaque année en France, soit approximativement un mètre cube par habitant, le

béton est le produit manufacturé le plus consommé. Malheureusement, au niveau de la planète, les cimenteries produisent à elles seules 7 % des gaz à effet de serre, la fabrication d'une tonne de ciment générant à elle seule environ une tonne de CO₂. La mise au point de bétons respectueux de l'environnement constitue donc un objectif sociétal majeur. Elle passe par une réduction de la quantité de ciment traditionnel dans la formulation de Bétons Environnementaux (BE). En l'absence de retours d'expérience sur ces nouveaux liants, seule une approche performantielle solide permettra d'autoriser l'utilisation pratique de ces solutions.

De façon plus générale, l'approche performantielle doit permettre le développement de l'utilisation de bétons modernes, depuis les BHP jusqu'aux BFUP. En effet, ces bétons permettent de réaliser des structures à très haute durabilité mais cette qualité n'est que très peu mise en valeur aujourd'hui du fait de la difficulté de la quantifier.

On peut noter également que la gamme des bétons utilisés pour la construction de bâtiment s'est récemment élargie à des bétons à propriétés thermiques spécifiques (faible conductivité) permettant une amélioration significative de la performance énergétique des bâtiments en réponse à l'évolution de la réglementation thermique. Le développement de ces bétons sera favorisé par la mise au point d'une méthodologie de justification performantielle reconnue (actuellement seuls certains types de granulats légers sont autorisés et les enrobages doivent être majorés pour assurer la protection des armatures).

Enfin, il peut être techniquement possible d'augmenter le taux d'utilisation des additions en substitution du ciment mais il est nécessaire de pouvoir définir les limites acceptables pour préserver la durabilité des structures. Alors que l'approche traditionnelle de prescription de moyens autorise de combiner du CEM I avec une addition (et plus récemment du CEM II/A avec une addition), l'approche performantielle peut permettre de valider des compositions incluant plusieurs additions (par exemple CEM I + laitier + cendres ou CEM I + laitier + addition calcaire) ou comportant une addition combinée avec un ciment d'un autre type que CEM I ou CEM II/A.

2 Contexte et enjeux

L'approche performantielle consiste à appréhender la durabilité des bétons en considérant non pas les seules données liées à la formulation mais certaines caractéristiques ou propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données. Différents concepts sont aujourd'hui développés afin de pouvoir mettre en œuvre une approche performantielle de la durabilité. Les deux principaux concepts correspondent, d'une part, à la méthode basée sur des indicateurs de durabilité et, d'autre part, au système reposant sur l'utilisation comparative des essais de performance. Notons que ces concepts ne sont pas opposés ni contradictoires, mais bien au contraire très complémentaires. Certains textes couramment cités dans les cahiers des charges des maîtres d'ouvrage, telles que les recommandations du LCPC pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel et pour la prévention des désordres liés à l'alcali-réaction et à la réaction sulfatique interne, utilisent de manière conjointe ces deux concepts ainsi que certaines obligations de moyens, on parle alors d'approche mixte.

Pour définir et prescrire un béton, trois approches prévues par la norme NF EN 206-1 sont à la disposition du prescripteur :

- l'approche prescriptive, en application des tableaux de l'annexe NA.F. de la norme NF EN 206-1 qui vise une durée de vie de 50 ans, complétée pour les ouvrages d'art

par les dispositions du fascicule 65 du CCTG qui vise une durée de vie de 100 ans ; cette approche définit des spécifications essentiellement en terme de moyens (nature et dosage des constituants),

- le concept de performance équivalente du béton (prévu à l'article 5.2.5.3 de la norme NF EN 206-1 et son annexe E) ; il permet de modifier les exigences prescriptives en ce qui concerne le dosage minimal en liant équivalent et le rapport maximal eau/liant équivalent sous réserve de prouver que le béton a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence, en particulier pour ce qui concerne son comportement vis-à-vis des agressions de l'environnement et sa durabilité, conformément aux exigences des classes d'exposition concernées,
- la méthode de conception performantielle (prévue à l'article 5.3.3 de la norme NF EN 206-1 et son annexe J) ; elle définit des stipulations en terme de résultats et donc de performances. La possibilité du recours à une telle approche est aussi prévue dans le fascicule 65 (article 8.1.2.2) et dans la norme NF EN 1992-1-1/NA tableau 4.3NF note 1 clause 4.4.1.2 (5).

Des travaux sont en cours au niveau européen et français pour préciser et harmoniser les méthodologies. Aujourd'hui, il existe en France deux principaux documents qui développent ces types d'approche :

- les recommandations professionnelles provisoires FNTF/FFB/CERIB/FIB de mars 2009 intitulées « Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons ». La méthodologie de qualification d'une composition de béton est fondée sur le concept de performance équivalente défini dans l'article 5.2.5.3 de la norme NF EN 206-1. Le principe est de modifier les prescriptions de composition des bétons en montrant, à l'aide d'essais performantiels et d'indicateurs de durabilité, que le béton à qualifier possède des propriétés de durabilité au moins aussi bonnes que celles d'un béton de référence,
- le guide du LCPC « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton - Application de l'approche performantielle » de mars 2010, élaboré à partir du guide AFGC pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, de juillet 2004. L'approche performantielle est déclinée pour son application aux ouvrages d'art. Il s'agit d'une démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé, basée essentiellement sur la notion d'indicateurs de durabilité, qui permet d'aborder rationnellement et efficacement les exigences liées au matériau béton vis-à-vis de cet objectif de durabilité. Elle permet en particulier d'apporter une réponse pertinente dans les cas fréquents où l'approche prescriptive conduit à des exigences difficiles à concilier, par exemple vis-à-vis du gel et de la réaction sulfatique interne.

Il faut noter que d'importants travaux ont été réalisés ou initiés en France concernant la normalisation des essais relatifs à la durabilité des bétons, ce qui permet aujourd'hui de disposer des outils de base indispensables au développement de l'approche performantielle. Parmi les principaux, on peut citer les projets GranDuBé et Applet qui ont permis notamment de définir des méthodes d'essais pour les indicateurs de durabilité et d'obtenir des données sur la variabilité des propriétés de durabilité des bétons en condition réelle d'utilisation. Le Projet National Perfdub se situe dans le prolongement et en cohérence avec ces travaux antérieurs. L'objectif est d'agrèger les connaissances et le retour d'expérience, de combler les manques, dans un cadre réunissant tous les acteurs concernés de manière à ce que l'approche performantielle soit opérationnelle, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui. Depuis une vingtaine d'années d'importants travaux de recherche au niveau international ont également proposé des modèles prédictifs associés aux principaux mécanismes conditionnant la durabilité des ouvrages en béton. Si ces modèles restent toujours en progrès, du moins est-il possible de développer une approche quantitative rationnelle de la durée de service

potentielle des ouvrages, juste construits ou en projet, en relation avec les propriétés physiques quantifiables par les essais sur lesquels s'appuie l'approche performantielle.

Les enjeux associés à l'approche performantielle de la durabilité sont donc considérables, en termes d'optimisation technico-économique des ouvrages en béton, de maîtrise des coûts de construction incluant ceux relatifs à la maintenance et de développement durable. En effet sur ce dernier point, l'utilisation de matériaux avantageux du point de vue environnemental (matériaux recyclés, déchets ou sous-produits) ne peut être développée sans vérification de son impact sur la durabilité des ouvrages. D'autre part, la maîtrise de la durabilité d'ouvrages sensibles comme ceux du domaine nucléaire (centrales nucléaires, ouvrages de stockage de déchets radioactifs) s'avère aujourd'hui essentielle.

L'approche performantielle ne fait pas aujourd'hui l'objet de règles normatives détaillées au niveau français comme au niveau européen. La version 2013 de la norme EN 206-1 ne mentionne, comme la version originelle de 2004, que des indications informatives. On notera également qu'il n'existe pas à l'heure actuelle d'essai rapide (concernant en particulier la résistance à la carbonatation et à la pénétration des chlorures) normalisé en Europe permettant la mesure d'indicateurs de durabilité. Dans cinq ou six ans, lors de la prochaine évolution de la norme, les résultats du projet national français pourront servir de base aux dispositions normatives qui ne manqueront pas d'être intégrées à ce stade.

On peut également mentionner une demande croissante « d'études justificatives de durabilité » pour de grands projets à l'international, en appui le cas échéant des montages financiers associés. La nécessité de méthodes d'études « balisées » pour l'ingénierie, allant si possible au-delà des indications du code-modèle fib 2010, serait un atout pour les partenaires français du Projet maîtrisant la méthodologie aussi bien en conception que dans sa mise en œuvre et son contrôle.

Enfin, il convient de souligner que l'approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton constitue un saut technologique majeur par rapport aux pratiques actuelles basées sur une approche de prescription de moyens (composition de béton, caractéristiques des constituants). Les références d'application à ce jour sont majoritairement des opérations où les spécifications de performance viennent en complément de prescriptions « classiques » de moyens.

3 Rappel des objectifs généraux et du champ de la recherche

L'objectif principal est de définir une méthodologie à l'échelle nationale de justification de la durabilité des bétons (et structures en béton) par approche performantielle, incluant la méthode « absolue » et la méthode « comparative ».

Cette méthodologie est destinée aux ouvrages pour lesquels un niveau spécifique d'assurance qualité est assuré. Il peut s'agir d'ouvrages de génie civil, de certaines constructions de bâtiments complexes (ouvrages de catégorie B ou C comportant des ouvrages particuliers PB ou PC) ou de certains produits préfabriqués en usine.

Le champ de la recherche concerne les ouvrages neufs mais s'intéresse aux ouvrages anciens dans le but de relier les pathologies ou le vieillissement observé au type de béton employé et à ses caractéristiques de durabilité.

Le projet couvre des problématiques très larges qui ont fait l'objet de nombreuses actions de recherche depuis une vingtaine d'années, son objectif est de conforter ou compléter les

données existantes et d'améliorer ainsi les recommandations d'emploi des approches performantielles absolue et comparative de façon à favoriser leur applicabilité.

N.B. : Il a été convenu en phase d'étude de faisabilité de ne pas traiter les sujets suivants qui conduiraient à un volume de recherche trop large et trop ambitieux : alcali-réaction, réaction sulfatique interne, certaines attaques chimiques (ammonium, magnésium).

4 Organisation du projet de recherche

L'organisation du projet est décrite dans le projet de charte joint en annexe 5.

4.1 Direction du projet

Le projet sera dirigé par le Comité Directeur qui s'appuiera sur un Comité Scientifique et Technique (CST) pour le pilotage opérationnel, chargé en particulier du lancement des appels d'offres des différentes tranches et du suivi des actions de recherche. Le CST sera animé par un Directeur Technique et un Directeur Scientifique.

4.2 Groupes de travail

Le programme de recherche est décliné en différents axes (présentés au chapitre 4) dont l'animation est confiée à un binôme formé d'un représentant du monde industriel et d'un représentant du monde académique afin d'assurer un bon équilibre entre les approches théoriques et pragmatiques.

Les thèmes de recherche correspondants sont les suivants :

- thème 1 : Essais de durabilité ;
- thème 2 : Définition des seuils de performance admissibles ;
- thème 3 : Bétons à étudier – bétons de référence ;
- thème 4 : Contractualisation de l'approche ;
- thème 5 : Valorisation des résultats.

Les thèmes 4 et 5 sont des thèmes transversaux qui seront impliqués dès le démarrage du projet. En particulier le thème 4 aura à sa charge la vérification que les actions menées au sein des thèmes 1, 2 et 3 permettront de répondre aux questions posées au sujet de l'approche performantielle de la durabilité des bétons.

4.3 Comité de suivi international

Il est prévu d'associer un comité de suivi international à la définition et au suivi du programme de recherche afin de favoriser l'intégration des résultats au niveau de la normalisation européenne.

Des premiers contacts ont été pris avec des experts européens dont une première liste a été dressée par partenaires du projet :

- S. Helland (N) ;

- S. Leivestad (N) ;
- T. Harrison (UK) ;
- K. Scrivener (CH) ;
- G. De Schutter (B) ;
- A. Goncalves (P) ;
- L. Meyer (D).

5 Programme de recherche

5.1 Essais de durabilité (Thème 1)

5.1.1 Contexte et objectifs

Les essais de durabilité sont de deux types :

- indicateurs de durabilité caractérisant les propriétés du béton en relation avec la résistance aux agressions extérieures et permettant d'alimenter des modèles de vieillissement (exemple : coefficient de diffusion des ions chlore vis-à-vis de la protection des armatures en milieu marin) ;
- essais de vieillissement accéléré (exemple : carbonatation accélérée).

Les essais de durabilité constituent le socle de l'approche performantielle de la durabilité des bétons. L'objectif du projet national est de disposer, pour chaque classe d'exposition du béton définie dans la norme NF EN206-1, d'un ou plusieurs indicateurs associés à des essais qui permettent de comparer et/ou d'évaluer la capacité d'un béton à résister à une dégradation donnée. Pour être légitimes et opérationnels, ces essais doivent disposer d'un référentiel technique robuste qui fasse consensus (modes opératoires, données de fidélité, effet de l'âge du béton) et qui puisse s'appliquer à la grande majorité des bétons utilisés à l'heure actuelle et dans l'avenir. Ils doivent également être mesurés à des échéances compatibles avec les contraintes de chantier, avec des durées d'essai limitées (au maximum 3 mois) et des méthodes d'essai suffisamment simples pour être accessibles à un grand nombre de laboratoires et économiquement viables. Les propositions de travail relatives aux essais de durabilité s'inscrivent donc dans un objectif général de rendre opérationnel le déploiement de l'approche performantielle sur l'ensemble des étapes de la vie d'un béton (spécification, formulation, contrôles de production et de construction et suivi du vieillissement). Le principe est de s'appuyer sur les travaux en cours et à venir pour faire émerger les consensus et approfondir les points critiques et les manques ; et ce en lien étroit avec les groupes de normalisation (GEF8 et GEDUB notamment), les groupes de travail nationaux (base de données des indicateurs de durabilité de l'AFGC notamment) et les travaux européens (CEN, RILEM par exemple).

Cette ambition se décline en plusieurs objectifs communs, pour la plupart, à l'ensemble des agressions du béton :

5.1.1.1 Objectif 1 : Consolider les essais normalisés ou en pré-normalisation pour disposer d'un référentiel technique utilisable dans le cadre de contractualisation de l'approche

Le travail s'articulera autour d'une part de l'analyse des campagnes d'essais réalisées récemment à l'échelle nationale, européenne voire internationale (Chlortest, GranDuBé notamment) et d'autre part de l'organisation de nouvelles campagnes d'essais croisés pour consolider les modes opératoires d'essais (voir objectif 2) et disposer de données de fidélité indispensables au déploiement de l'approche performantielle sur le terrain (jugement de conformité par exemple) (voir §5.5).

5.1.1.2 Objectif 2 : Approfondir et étudier certains essais pour combler les manques, lever les verrous, améliorer la connaissance et enrichir le référentiel technique

Le travail portera tout d'abord sur certaines étapes de pré-conditionnement d'essais qui nécessitent des précisions ou des ajustements. Il abordera également l'effet de l'âge du béton sur les résultats d'essais, problématique majeure pour le déploiement opérationnel des essais notamment pour encadrer et justifier les essais réalisés dans le cadre du suivi et du contrôle de production et de construction (délais). Il traitera en outre du comportement et de la réponse des bétons modernes (bétons avec CEMIII, CEMV, forte teneur en additions, matrice cimentaire à faible teneur en composés carbonatés, bétons à fort volume de pâte comme les BAP) à ces essais. Ce point est crucial puisque l'approche performantielle vise notamment à favoriser les formules de bétons durables à faibles impact environnementaux et d'une manière générale à contribuer à l'optimisation des formules. Il complétera et affinera enfin les éventuelles corrélations entre les indicateurs. Il conduira in fine à l'établissement de modes opératoires consolidés dont certains feront l'objet de campagnes d'essais croisés (voir objectif 1).

5.1.1.3 Objectif 3 : Établir un cadre d'utilisation des essais de durabilité dans un contexte d'évaluation de la durabilité des ouvrages existants

L'approche performantielle doit conduire à l'utilisation de bétons durables résistants aux agressions pour lesquelles ils ont été prescrits. Les essais de durabilité permettent de s'en assurer en amont et en cours de construction. Ces essais permettent également d'évaluer la durabilité des bétons des ouvrages en service. Il s'agit là d'un enjeu majeur pour les maîtres d'ouvrage gestionnaires qui ont besoin de connaître l'état de leurs ouvrages et d'anticiper leurs dégradations pour optimiser leurs plans de maintenance. Les essais de durabilité, réalisés dans le cadre de diagnostics en association avec d'autres techniques, constituent des outils indispensables à l'évaluation et à la prédiction du vieillissement des ouvrages en service. Le travail portera donc sur le choix des essais d'évaluation au regard de critères à définir, sur les modalités de prélèvements et d'échantillonnage et sur les éventuelles adaptations des modes opératoires (prise en compte de l'effet de parement notamment). Seront également identifiées les modalités d'utilisation des résultats d'essais (classes de durabilité potentielle, modèles prédictifs). Ce travail se fera en lien avec les travaux de calage des seuils admissibles s'appuyant sur l'évaluation d'un panel d'ouvrages existants (voir §5.2.3). Ce travail sera également l'occasion d'identifier les liens et les complémentarités avec d'autres méthodes d'évaluation de la durabilité du béton (voir §5.2.3).

5.1.1.4 Objectif 4 : Améliorer la lisibilité des différents essais pour faciliter la diffusion et l'appropriation de l'approche performantielle

Le panel d'essais relatifs aux différentes attaques du béton est très large. Il comprend des essais de vieillissement accéléré (essai de carbonatation accéléré par exemple), des essais d'évaluation des propriétés de transfert (essais de migration ou de diffusion des chlorures, perméabilité) et des essais de caractérisation (porosité par exemple). Certains essais permettent d'accéder à une propriété spécifique d'un phénomène (diffusion des chlorures par exemple) alors que d'autres sont plus généraux (porosité, perméabilité). Enfin, certains essais permettent de classer les bétons entre eux d'une manière « absolue » alors que d'autres permettent un classement relatif. Pour certains essais, les résultats obtenus peuvent en outre être définis comme des indicateurs de durabilité (généraux ou de substitution). Afin d'améliorer la lisibilité et de faciliter la diffusion et l'appropriation de l'approche performantielle, un travail de terminologie et de classification des essais s'impose. Une classification fonction de la nature du résultat et de son utilisation possible pourra être envisagée.

Parmi le panel des essais de durabilité des bétons, sept ont été retenus dans le cadre du projet. Ils se répartissent de la manière suivante :

Indicateurs spécifiques	Carbonatation accélérée Migration des chlorures (stationnaire et non stationnaire) Essai de performance (gel interne) Facteur d'espacement Ecaillage Essai de vieillissement accéléré (réaction sulfatique externe) Lixiviation à pH constant Essai de vieillissement accéléré (biodégradation)
Indicateurs généraux	Porosité accessible à l'eau Perméabilité au gaz
Indicateurs de substitution	Absorption capillaire Absorption d'eau Résistivité

5.1.2 Principes généraux d'organisation

Le groupe de travail relatif aux essais de durabilité (GT1) est décliné en trois sous-groupes fonction du type d'agression du béton (GT1a, GT1b, GT1c). L'animation de chaque sous-groupe est confiée à un binôme.

GT1 : Essais de durabilité	Vicat, Cerema
GT1a : Carbonatation, chlorures	LaSIE, ECN
GT1b : Gel interne, écaillage	ATILH, Vicat
GT1c : Attaques chimiques externes	IFSTTAR, LMDC

Lors de l'étude de montage, les discussions ont abouti à la définition d'une méthode de travail commune aux trois sous-groupes et s'appuyant sur trois phases principales :

5.1.2.1 Phase 1 : Préliminaire

L'objectif de cette phase est de caler les différents modes opératoires d'essais préalablement à la phase 2. La plupart des procédures d'essais qu'elles soient normalisées ou non peuvent présenter des lacunes, des variantes et des imprécisions qu'il convient d'identifier. Certains essais en cours de développement nécessitent une étude préalable pour statuer sur les paramètres d'essais. Ce travail donnera lieu à des modes opératoires harmonisés limitant les écarts entre laboratoires. Il s'appuiera en amont sur une capitalisation des projets antérieurs et en cours (de manière non exhaustive on peut citer par exemple BHP2000, APLET, Grandubé, Chlortest, RECYBéton). Enfin, afin d'aboutir à une stabilisation définitive, les modes opératoires harmonisés seront testés sur un certain nombre de compositions de béton représentatives (parmi les compositions définies par le GT3) par plusieurs laboratoires spécialistes des essais considérés. La phase 1 nécessitera une première série de fabrication de béton. Le laboratoire responsable de la fabrication sera chargé de caractériser le béton à l'état frais (consistance notamment) et durcis (résistance à la compression).

5.1.2.2 Phase 2 : Caractérisation des bétons du projet

Il s'agit de la phase capitale du GT1 puisqu'elle a pour objectif de caractériser les différents bétons du projet. Dans cette phase, les 37 compositions de béton définies par le GT3 seront caractérisées conformément aux modes opératoires définis à l'issue de la phase 1. Pour chacun des essais, plusieurs laboratoires seront sollicités.

Les essais conduits dans le cadre de cette phase permettront d'étudier différents paramètres d'essais. On peut citer, à titre d'exemple, l'impact du mode de cure sur l'essai de carbonatation accélérée, l'impact du séchage dans la détermination de la perméabilité au gaz et l'effet de l'âge (*ageing effect*). L'analyse des résultats de la phase 2 permettra également d'étudier l'influence des paramètres de compositions de bétons sur les différents indicateurs de durabilité. Enfin, tous les indicateurs étant évalués sur l'ensemble des compositions, des études de corrélation entre indicateurs pourront être menées.

La phase 2 nécessitera une deuxième série de fabrication de béton. Le laboratoire responsable de la fabrication sera chargé de caractériser le béton à l'état frais (consistance notamment) et durcis (résistance à la compression).

La caractérisation des bétons d'ouvrages existants (GT2) mobilisera également les laboratoires du projet.

5.1.2.3 Phase 3 : Essais croisés inter-laboratoires

La reproductibilité est une donnée essentielle des essais et indicateurs de durabilité, car nécessaire pour conclure sur des différences significatives de durabilité potentielle. Elle sera évaluée par des essais croisés inter-laboratoires, la fabrication des matériaux étant centralisée. Plusieurs campagnes successives sont généralement nécessaires pour permettre l'appropriation des modes opératoires par les laboratoires participants, assurer la convergence des évolutions des dispositifs existants et apporter d'éventuelles modifications aux procédures expérimentales afin d'en améliorer la reproductibilité.

A l'appui des phases 1 et 2, il est donc proposé d'organiser des campagnes d'essais croisés portant sur les essais étudiés dans le projet. Ces essais croisés permettront d'enrichir le référentiel de l'approche performantielle avec des données de fidélité. La phase 3 nécessitera une troisième série de fabrication de béton.

Dans la suite du document, les propositions de travail sont déclinées par type d'agression ou de phénomène selon le phasage présenté ci-avant. On traitera le cas général des agressions par un phénomène dominant, considéré comme seul paramètre dimensionnant, et ponctuellement le cas des agressions multiples pouvant éventuellement donner lieu à couplage (c'est le cas par exemple de l'exposition au gel et aux sels de déverglaçage).

5.1.2.4 Cartographies des laboratoires et des essais

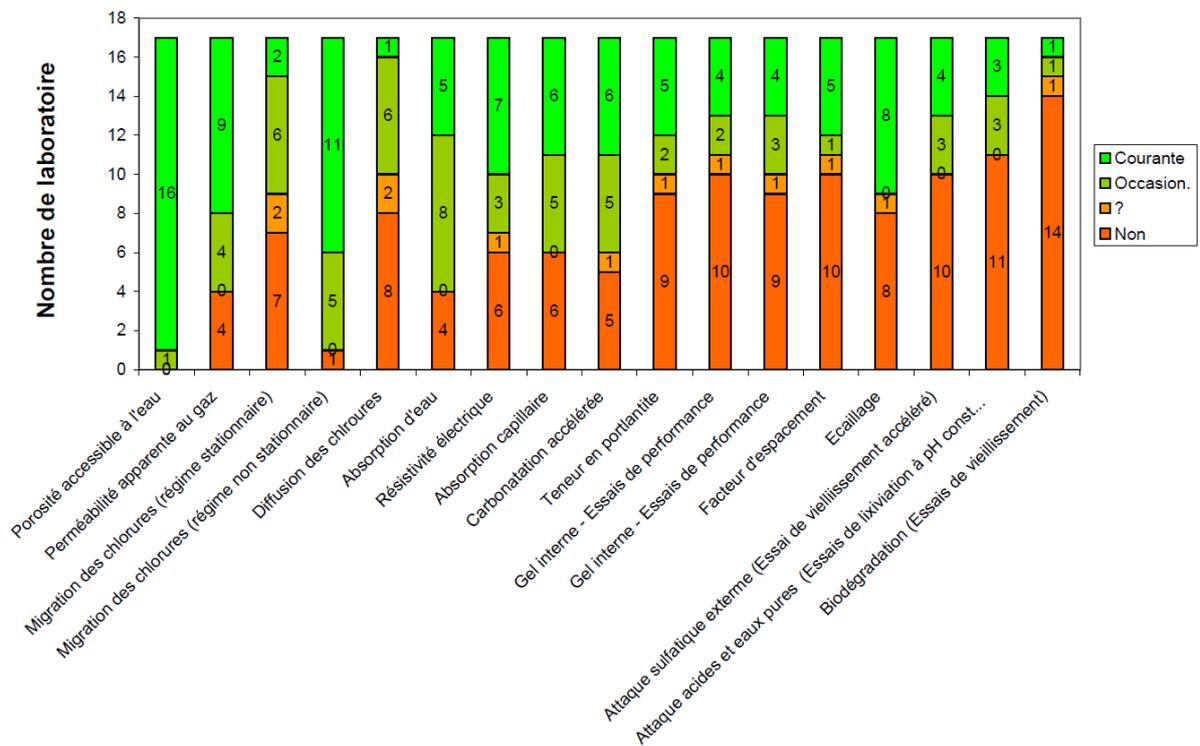
Dans le cadre de l'étude de montage du projet, une enquête a été menée auprès des laboratoires identifiés dans les différents groupes de travail. Cette enquête avait deux principaux objectifs : faire un état des lieux de la pratique des essais de durabilité au niveau national d'une part et évaluer la capacité des laboratoires dans la perspective du projet d'autre part. L'enquête a permis de :

- recenser les laboratoires intéressés pour contribuer aux campagnes d'essais qui seront réalisées dans le PN ;
- connaître le positionnement des laboratoires sur les différents essais ;
- connaître le niveau de pratique et d'appropriation des protocoles d'essais par les laboratoires ;
- évaluer/estimer la capacité des laboratoires à contribuer aux campagnes d'essais (au regard du calendrier général du PN) ;
- identifier, pour chaque essai, les paramètres (de protocole et de formulation) susceptibles d'impacter les résultats d'essais.

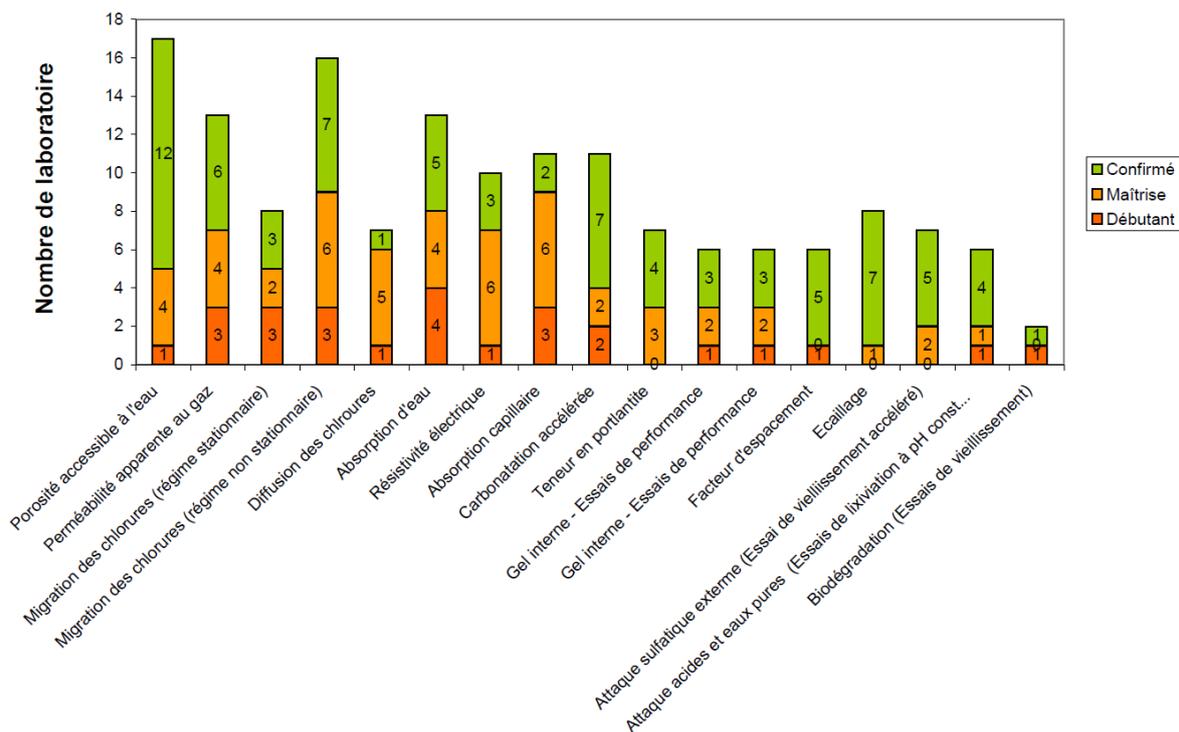
Dix-sept laboratoires ont répondu à l'enquête permettant ainsi d'avoir une image a priori représentative de la situation nationale.

Essais	Référence	Pratique de l'essai					Niveau de pratique			Participation aux campagnes de caractérisation des bétons (phases 1 et 2)		Participation aux campagnes d'essais croisés (phase 3)	
		Non	?	Occasion.	Courante	Pratique	Débutant	Maîtrise	Confirmé	Oui	?	Oui	?
GT1a	Porosité accessible à l'eau NF P18-459	0	0	1	16	17	1	4	12	13	3	13	3
	Perméabilité apparente au gaz XP P18-463	4	0	4	9	13	3	4	6	9	4	9	4
	Migration des chlorures (régime stationnaire) XP P18-461	7	2	6	2	8	3	2	3	5	4	5	4
	Migration des chlorures (régime non stationnaire) XP P18-462	1	0	5	11	16	3	6	7	11	4	11	3
	Diffusion des chlorures CENTS12390-11	8	2	6	1	7	1	5	1	4	4	3	4
	Absorption d'eau NF EN 13369	4	0	8	5	13	4	4	5	9	4	7	5
	Résistivité électrique LCPC 2010	6	1	3	7	10	1	6	3	8	5	8	5
	Absorption capillaire Grandubé 2007	6	0	5	6	11	3	6	2	8	4	8	4
	Carbonatation accélérée (ou CENTS 12390 12: 2010) XP P18-458	5	1	5	6	11	2	2	7	8	4	8	4
Teneur en portlandite Grandubé 2007	9	1	2	5	7	0	3	4	5	4	5	4	
GT1b	Gel interne - Essais de performance NF P18-424	10	1	2	4	6	1	2	3	2	4	3	4
	Gel interne - Essais de performance NF P18-425	9	1	3	4	7	1	2	3	2	4	2	4
	Facteur d'espacement ASTM C457-98 Partie 2	10	1	1	5	6	1	0	5	4	4	4	4
	Ecaillage XP P18-420	8	1	0	8	8	0	1	7	3	3	4	3
GT1c	Attaque sulfatique externe (Essai de vieillissement accéléré) Messad 2009, Garcia 2009, ...	10	0	3	4	7	0	2	5	4	3	4	4
	Attaque acides et eaux pures (Essais de lixiviation à pH constant) Recommendations FNTF 2009, Gef8	11	0	3	3	6	1	1	4	6	2	4	3
	Biodégradation (Essais de vieillissement) Herisson 2012, Scrivener et De Belle 2013	14	1	1	1	2	1	0	1	2	0	1	2

Les deux graphiques ci-après présentent l'état des lieux de la pratique des essais par les laboratoires et de leur niveau d'appropriation.



Graphique 1: Niveau de pratique des essais par les laboratoires



Graphique 2: Niveau d'appropriation des essais par les laboratoires

5.1.3 Essais relatifs à la carbonatation (GT1a)

Les axes de travail proposés dans le projet sont envisagés dans le sens d'une amélioration de l'existant. L'ambition est de consolider un protocole d'essai de carbonatation accéléré et d'éclairer le choix relatif à la concentration en CO₂ dans la perspective de disposer d'un essai simple et représentatif avec une durée si possible compatible avec les projets de construction.

5.1.3.1 Phase 1 : Préliminaire

Lors de la phase 1, deux protocoles seront étudiés : celui de la norme française actuelle (XP P18-458) et celui du protocole européen (FprCEN/TS12390-12). La concentration en CO₂ du protocole européen (1 ou 4 %) sera choisie au début du projet. On rappelle dans le tableau ci-après les paramètres clefs des principaux protocoles utilisés au niveau national.

	XP P18-458 2008	FprCEN/TS 12390-12 2010
Pré-conditionnement	14 jours à 45°C	14 jours à 18-25°C et 55±5% HR
Taux CO ₂ (%)	50	1 ou 4
T et HR pendant la carbonatation	20°C 60-65% HR	20°C 55±5% HR
Echéance (jours)	28	70

La phase 1 sera conduite sur 5 compositions de béton représentatives (classes d'exposition XC) par 5 laboratoires. Chaque laboratoire caractérisera les 5 compositions retenues selon les 2 protocoles (français et européen).

L'influence du pré-conditionnement sera évaluée à partir de paramètres tels que notamment les profils de saturation en eau par gamma-densimétrie et les cinétiques même de carbonatation (profondeurs) à déterminer dès les premiers jours de l'essai accéléré. La norme française présente l'avantage de pouvoir tester des bétons très performants à faible porosité (BHP). Cependant, pour les bétons de classe de résistance plus ordinaire, elle semble en revanche très sévère. En fonction des résultats obtenus sur les 5 compositions de béton, la phase 1 pourra aborder la nécessité ou non d'adapter le pré-conditionnement suivant la nature du liant et la classe de résistance des bétons.

L'influence de la concentration en CO₂ sera étudiée au travers des deux teneurs appliquées (50 % et 1 ou 4 %). Des études complémentaires seront proposées sur la base de ces résultats et d'une analyse préalable exhaustive relative à ce sujet. Ces études ne s'inscrivent pas dans le cadre du projet Perfdub.

A l'issue de la phase 1, un des deux protocoles sera retenu pour la phase 2. Le protocole définitif apportera notamment des précisions sur la nature de la surface de rupture (fendage, coupe-pavés, sciage), sur le mode de régulation de l'humidité, sur les mesures à effectuer au cours de l'essai et sur la géométrie des échantillons.

Livrables :

- synthèse de l'état de l'art relatif aux procédures d'essai et aux paramètres influents de l'essai (protocole, nature des bétons).
- rapport relatif à la campagne d'essais et propositions d'un mode opératoire consolidé.

5.1.3.2 Phase 2 : Caractérisation des bétons du projet

Dans cette phase, les 37 compositions de béton seront caractérisées conformément au mode opératoire retenu à l'issue de la phase 1.

Chaque béton sera caractérisé selon deux modes de cures : cure sous eau jusqu'à l'âge de 28 jours et cure jusqu'à une maturité correspondant à 35% de la résistance caractéristique à 28 jours.

Il pourra être envisagé de compléter la caractérisation des bétons par la détermination de leur teneur en matière carbonatable par une méthode définie préalablement (méthode analytique par exemple).

L'exploitation des résultats de la phase 2 feront l'objet d'une analyse qui portera notamment sur les corrélations entre les deux indicateurs spécifiques de la carbonatation (teneur en CH, porosité), les autres indicateurs (perméabilité au gaz notamment) et les résultats de carbonatation accélérée. Ce travail s'appuiera, en complément des résultats de la phase 2, sur les résultats obtenus dans le cadre de projets antérieurs ainsi que sur la base de données AFGC relatives aux indicateurs de durabilité. Les résultats de la campagne européenne inter-laboratoires réalisée en 2011 dans le cadre des travaux européens relatifs aux essais de carbonatation seront également étudiés.

La construction d'un indicateur « combiné » utilisant les données de perméabilité ou de porosité et de teneur en produits carbonatés sera également abordée en prenant en compte le degré de saturation du béton. Ceci intégrera une méthode de détermination indirecte du coefficient de diffusion du CO₂ améliorée par rapport à celles basées sur la seule donnée de porosité (en l'absence d'une méthode directe qui pourra faire l'objet d'une recherche à caractère plus fondamentale, voir description du projet de recherche ANR « Modevie » en annexe 4). Les résultats des évaluations pratiquées sur le panel d'ouvrages en service (voir §5.2.3) seront également exploités pour conforter et ajuster les résultats des travaux et contribuer à l'établissement d'un protocole pour l'évaluation et la prédiction de la carbonatation sur ouvrage.

Livrables :

- un rapport en fin de phase 2 présentant les résultats des campagnes d'essais et leur analyse.

5.1.3.3 Phase 3 : Essais croisés inter-laboratoires

La campagne d'essais croisés sera conduite sur 5 compositions de béton représentatives (classe d'exposition XC) selon le mode opératoire harmonisé et ajusté à l'issue des phases 1 et 2.

Livrables :

- un rapport de synthèse.

5.1.4 Essais relatifs à la pénétration des chlorures (GT1a)

Les axes de travail proposés dans le projet sont envisagés dans le sens d'une amélioration de l'existant. L'ambition est de consolider les protocoles d'essai pour la détermination des coefficients de diffusion (apparent D_{app} et effectif D_{eff}) des chlorures et d'évaluer l'effet du vieillissement du béton (*ageing effect*) sur les indicateurs de durabilité spécifiques à la pénétration des chlorures pour aboutir à des échéances d'essais qui restent pertinents tout en étant compatibles avec les projets de construction. La mise à disposition de données de fidélité est également une attente forte.

5.1.4.1 Phase 1 : Préliminaire

La détermination des coefficients de diffusion apparent et effectif des chlorures fait l'objet de deux normes expérimentales (respectivement XP P18-461 et XP P18-462). Elle s'appuie sur un essai de migration sous champ électrique (stationnaire pour la détermination du coefficient de diffusion effectif et non-stationnaire pour la détermination du coefficient de diffusion apparent).

Dans l'objectif de capitaliser les expériences passées, la phase 1 comprendra dans un premier temps une analyse des projets antérieurs portant sur la problématique (Chloritest, Grandubé, APPLLET notamment).

Dans un deuxième temps, la phase 1 comprendra la conduite par 5 laboratoires des deux variantes d'essais (stationnaire et non-stationnaire) sur 5 compositions de béton représentatives (classes d'exposition XS et XD).

A l'issue de cette phase, des propositions de compléments ou de précisions seront formulées.

Livrables :

- synthèse de l'état de l'art relatif aux procédures d'essai et aux paramètres influents de l'essai (protocole, nature des bétons).
- rapport relatif à la campagne d'essais et propositions d'un mode opératoire consolidé.

5.1.4.2 Phase 2 : Caractérisation des bétons du projet

Dans cette phase, les compositions de béton du projet seront caractérisées conformément aux deux modes opératoires définis à l'issue de la phase 1.

Les données issues de l'état de l'art montrent la nécessité de tenir compte de l'évolution dans le temps du coefficient de diffusion (*ageing effect*) dans le cas d'expositions précoces et pour valoriser les performances à long terme de certains bétons. C'est pourquoi les essais seront réalisés à 2 âges du béton (28 et 90 jours). 15 compositions de béton feront l'objet d'une caractérisation (migration en régime non stationnaire) à deux âges supplémentaires.

Les 37 compositions de béton seront caractérisées suivant l'essai de migration en régime non stationnaire (obtention de D_{app}). Seules les compositions de béton relatives aux classes d'exposition XS2 et XS3 seront caractérisées suivant l'essai de migration en régime stationnaire (D_{eff}) (soit 14 compositions). En complément et pour enrichir la caractérisation des bétons du projet (capacité de fixation des chlorures), les compositions relatives aux classes d'exposition XS2 et XS3 feront l'objet de détermination des isothermes d'interaction (à 90 jours). De même l'effet de la température, susceptible de modifier la cinétique du phénomène, sera étudié.

L'état de l'art a permis de mettre en évidence la difficulté de concilier la caractérisation rapide de la durabilité potentielle des bétons et la prise en compte du comportement à long terme. Or l'application de l'approche performantielle doit pouvoir permettre de qualifier des bétons sortant des domaines de composition courants mais présentant un intérêt global sur la durée de vie des structures en béton. L'exploitation des résultats de la phase 2 contribuera à définir une méthode harmonisée de quantification de l'évolution temporelle du coefficient de diffusion, en cohérence avec les normes retenues pour la détermination de l'indicateur, la réalité des phénomènes physico-chimiques et les modèles de durabilité.

Les résultats de la phase 2 feront l'objet d'une analyse qui portera notamment sur les corrélations entre les indicateurs spécifiques D_{app} / D_{eff} et les autres indicateurs (généraux et de substitution) et ce en lien avec la nature des différents bétons du projet.

Livrables :

- un rapport en fin de phase 2 présentant les résultats des campagnes d'essais et leur analyse.

5.1.4.3 Phase 3 : Essais croisés inter-laboratoires

L'expérience acquise lors des phases 1 et 2 sera utilisée pour concevoir une campagne d'essais croisés dont le but sera d'évaluer la reproductibilité et la répétabilité des modes opératoires retenus pour évaluer la résistance de bétons à la pénétration des chlorures (en lien avec les normes expérimentales parues récemment – XP P18-461 et XP P18-462).

La campagne d'essais croisés sera conduite sur 5 compositions de béton représentatives (classes d'exposition XS et XD) selon les modes opératoires harmonisés et ajustés à l'issue des phases 1 et 2.

Livrables :

- un rapport de synthèse.

5.1.5 Autres essais et indicateurs relatifs à la carbonatation et à la pénétration des chlorures

5.1.5.1 Indicateurs généraux

5.1.5.1.1 Porosité accessible à l'eau

Sans remettre en question la norme d'essai publiée en 2010 (NF P18-459), le travail relatif à la porosité accessible à l'eau aura pour objectif de mieux encadrer et maîtriser la réalisation de l'essai. Seront abordés l'impact éventuel d'une part du séchage (105°C) (influence du volume de pâte et de la nature du liant) et d'autre part de la durée de saturation sous vide (spécifiquement pour les échantillons de bétons prélevés dans les ouvrages existants (GT2)). La réponse des bétons à fort volume de pâte (Bétons Autoplaçants notamment) sera analysée de même que l'effet du vieillissement (*ageing effect*). Les données de fidélité actuelles de l'essai étant insuffisantes (limitées et non représentatives du mode opératoire de la norme), cet essai fera l'objet d'une campagne d'essais croisés.

Phase	Contenu	Livrable
Phase 1 Préliminaire	5 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées par 5 laboratoires selon deux variantes (2 températures de séchage).	Proposition d'un protocole consolidé
Phase 2 Caractérisation des bétons du projet	37 compositions de béton (GT3) caractérisées à 2 âges (28 et 90 jours)	Rapport présentant les résultats des campagnes d'essais, leur analyse et leur interprétation
Phase 3 Essais croisés interlaboratoires	5 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées	Rapport de synthèse

5.1.5.1.2 Perméabilité au gaz

Le travail relatif à la perméabilité au gaz, qui fait l'objet d'une norme expérimentale depuis 2011 (XP P18-463), permettra d'une part de mieux apprécier l'influence de la température de la dernière phase de séchage selon la nature du béton et d'autre part une meilleure exploitation des résultats d'essais (mesures à trois pressions différentes, mesures à trois niveaux de saturation en eau) notamment pour mieux maîtriser la réponse des bétons modernes. Comme pour les autres

essais, l'*ageing effect* sera étudié. Enfin, les données de fidélité actuelles étant insuffisantes (anciennes, restrictives et non représentatives du mode opératoire de la norme), cet essai fera l'objet d'une campagne d'essais croisés.

Phase	Contenu	Livrable
Phase 1 Préliminaire	5 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées par 5 laboratoires selon deux variantes (2 températures de séchage : 80 et 105°C).	Proposition d'un protocole consolidé
Phase 2 Caractérisation des bétons du projet	37 compositions de béton (GT3) caractérisées à 2 âges (28 et 90 jours)	Rapport présentant les résultats des campagnes d'essais, leur analyse et leur interprétation
Phase 3 Essais croisés inter-laboratoires	5 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées	Rapport de synthèse

5.1.5.2 Indicateurs de substitution

5.1.5.2.1 Résistivité électrique

Le travail consistera à ajuster et à consolider le mode opératoire tel que décrit dans les recommandations provisoires du LCPC et aboutira à l'établissement d'une méthode d'essai nationale. La nature de la solution d'imprégnation des corps d'épreuve préalable à la mesure de la résistivité étant un paramètre important de l'essai, elle fera l'objet d'une attention particulière. L'influence de la durée de saturation sous vide pourra être étudiée à partir des essais qui seront conduits sur les ouvrages existants (GT2). La campagne de caractérisation des bétons du projet (37 compositions) permettra de connaître la réponse de différentes gammes de béton. Cet essai présentant un intérêt pour le suivi et le contrôle de production et de construction, la problématique de l'*ageing effect* sera également abordée de même que les corrélations avec les autres indicateurs. La réalisation de cet essai sera judicieusement couplée à celle de l'essai de migration des chlorures (dans la pratique des laboratoires, ces deux essais sont souvent associés). Enfin, une campagne d'essais croisés permettra de déterminer les données de fidélité de cet essai.

Phase	Contenu	Livrable
Phase 1 Préliminaire	5 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées par 5 laboratoires selon deux variantes (2 types de solution de saturation).	Proposition d'un protocole consolidé
Phase 2 Caractérisation des bétons du projet	37 compositions de béton (GT3) caractérisées à 2 âges (28 et 90 jours)	Rapport présentant les résultats des campagnes d'essais, leur analyse et leur interprétation
Phase 3 Essais croisés inter-laboratoires	5 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées	Rapport de synthèse

5.1.5.2.2 Absorption capillaire

Le travail consistera à ajuster et à consolider le mode opératoire tel que décrit dans GranDuBé notamment en approfondissant les modalités d'exploitation de l'essai (courbe d'absorption notamment) et aboutira à l'établissement d'une méthode d'essai nationale. Comme pour l'essai de porosité et de perméabilité au

gaz, l'influence de la température de séchage selon la nature du béton fera l'objet d'une attention particulière. La campagne de caractérisation des bétons du projet (37 compositions) permettra de connaître la réponse de différentes gammes de béton. Cet essai présentant un intérêt pour le suivi et le contrôle de production et de construction, la problématique de l'*ageing effect* sera également abordée de même que les corrélations avec les autres indicateurs. La réalisation de cet essai sera judicieusement couplée à celle de l'essai de porosité accessible à l'eau (dans la pratique, ces deux essais peuvent facilement être associés). Enfin, une campagne d'essais croisés permettra de déterminer les données de fidélité de cet essai.

Phase	Contenu	Livrable
Phase 1 Preliminaire	5 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées par 5 laboratoires	Proposition d'un protocole consolidé
Phase 2 Caractérisation des bétons du projet	37 compositions de béton (GT3) caractérisées à 2 âges (28 et 90 jours)	Rapport présentant les résultats des campagnes d'essais, leur analyse et leur interprétation
Phase 3 Essais croisés inter-laboratoires	5 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées	Rapport de synthèse

5.1.6 Essais relatifs au gel et aux sels de déverglaçage (GT1b)

L'approche performantielle, déjà utilisée pour la résistance au gel et aux sels, nécessite deux améliorations principales :

- améliorer les caractéristiques de répétabilité et de reproductibilité de l'essai d'écaillage (classe XF4), en particulier vis-à-vis des ciments et liants à faible taux de clinker ;
- étude des températures de bétons de corps d'épreuve du PN BHP 2000 déposés en site de moyenne altitude dans la vallée de la Maurienne ;
- mise en place de corps d'épreuve récent sur zone d'étude du réseau autoroutier alpin ;
- nouvelle campagne de mesures des températures de bétons placés en environnement hivernal pour définir la réalité des cycles de gel- dégel et l'action effective des sels de déverglaçage sur le cycle de température ;
- définition d'un essai de performance pour les conditions de gel modéré (classe XF2) ;
- étude comparative des approches des différents pays européens sur cette question de la durabilité au gel.

Ces sujets sont actuellement à l'étude dans le cadre des travaux européens du CN/TC51/WG12, soit du TG1 (méthodes d'études de la durabilité), soit du TG4 (Essais de gel en présence de sels de déverglaçage).

Le Projet National adaptera son programme en fonction des actions menées à ce niveau.

5.1.7 Essais relatifs aux attaques chimiques externes (GT1c)

5.1.7.1 Attaques sulfatiques externes

Les objectifs sont les suivants :

- finaliser le choix et les conditions de vieillissement de l'essai tel que développé

par S. Messad. Des études complémentaires seraient nécessaires pour caler certains paramètres (dimensions des éprouvettes, temps de cure avant vieillissement, avec ou sans pré-saturation, établissement d'une charte visuelle) ;

- expliquer le comportement des certains ciments CEMI PM-ES, réputés in situ résistants aux milieux sulfatiques (compréhension des mécanismes, établissement des seuils pour chaque indicateur), mais dégradés par l'essai accéléré ;
- mener une campagne d'essais croisés pour connaître la reproductibilité de la méthode, mais aussi mieux définir la précision des paramètres du vieillissement ;
- tester la réponse de l'essai sur des bétons avec différents types de liants ou incorporant des additions minérales ;
- vérifier la représentativité et la validité de l'essai pour des carottes de bétons extraites d'ouvrages anciens. Cette phase permettrait de s'assurer que les mécanismes de vieillissement du matériau entre l'ouvrage et le laboratoire sont identiques avec uniquement une accélération de la cinétique de dégradation ;
- ausculter un cas réel de pathologie déclarée sur ouvrage afin de s'assurer que l'essai accéléré traduit bien les mécanismes observés.

Quatre laboratoires sont volontaires pour participer à l'étude : IFSTTAR, GEM, LCR LAFARGE, LMDC.

Phase	Contenu
Phase 1 Préliminaire	<p>Le travail porte sur la mise en place d'un essai de vieillissement accéléré relatif à la réaction sulfatique externe basé sur les travaux de (Messad, 2009). Les conclusions des différentes campagnes expérimentales complémentaires à ces travaux (Garcia et Carcassés 2009, Rozière et al, 2013, Cassagnabère et al 2013 et Linger et al 2013) conduisent à proposer 3 pistes d'approfondissement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la validation de l'essai pour des ciments de nature différente : Pour cela, 4 bétons incorporant 4 ciments (CEM I très réactif, 2 CEM I SR avec deux niveaux de performances et un CEM III/C) seront testés. - l'impact de la forme des éprouvettes sur la dégradation : Dans cette partie, deux types d'échantillon seront testés : des éprouvettes cylindriques (11x22cm) et prismatiques (7x7x28 cm) - l'impact de la régulation du pH : Deux aspects seront abordés : une régulation de pH avec une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄ diluée à 5g/l) et sans régulation de pH. Dans les deux cas, la solution d'attaque (solution de Na₂SO₄ avec 8,9g/l équivalent à 6 g/L de SO₄) sera renouvelée toutes les 4 semaines. <p>D'une manière pratique, après un coulage des échantillons au LMDC avec les différents ciments (Lafarge et Calcia), les échantillons seront envoyés dans les différents laboratoires pour expertises.</p> <p>Livrable : rapport présentant les résultats de la campagnes d'essais préliminaire avec analyses et interprétation.</p>
Phase 2 Caractérisation des bétons du projet	<p>5 compositions de béton représentatives (GT3) caractérisées à 2 âges (28 et 90 jours). 5 bétons d'ouvrages existants (GT2) caractérisées.</p>
Phase 3 Essais croisés inter-laboratoires	<p>5 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées par les 4 laboratoires identifiés ci-avant</p> <p>Livrable : rapport de synthèse intégrant les trois phases de l'étude (préliminaire, béton GT3, bétons d'ouvrage et essais croisés).</p>

5.1.7.2 Attaques acides et eaux pures

Les essais font appel au mode opératoire en cours d'examen au sein de la commission de normalisation « Essai de lixiviation à pH constant ».

Cinq laboratoires sont volontaires pour participer à l'étude (LMDC, LERM, EDF, CEA, CERIB).

Phase	Contenu
Phase 1 Préliminaire	<p>Afin d'améliorer la robustesse de l'essai et de le rendre plus discriminant (en particulier pour la classe XA1 et les bétons à base de granulats calcaires), il est proposé de réaliser une étude expérimentale complémentaire et dans la continuité des travaux du GT Lixiviation du GEF8.</p> <p>Trois variantes d'essais sont envisagées (A, B et C) :</p> <p><u>Variante A</u> : L'essai est conduit selon le mode opératoire actuel en augmentant la surface de béton en contact avec la solution acide (le volume d'acide maximal pourrait être modifié, à discuter). Seul l'indicateur EPDpH (phénol) serait utilisé.</p> <p><u>Variante B</u> : L'essai est conduit selon le mode opératoire de la variante A avec une température régulée à 30°C.</p> <p><u>Variante C</u> : L'essai est conduit selon le mode opératoire de la variante B avec un pH abaissé de 0,5.</p> <p>Pour chacune des variantes, trois compositions de béton (XA1, granulats calcaires, Dmax = 20mm) seront testées :</p> <p><u>Béton 1</u> : E/C=0,55, à base de CEM V</p> <p><u>Béton 2</u> : E/C=0,55, à base de CEM I</p> <p><u>Béton 3</u> : E/C=0,45 (ou 0,65 ?), à base de CEM V, même volume de pâte que le béton 1</p> <p>11 essais sont à prévoir. Ils devront permettre de choisir le meilleur mode opératoire pour la phase 2.</p> <p>Livrables :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rapport relatif au comportement des bétons testés en fonction des différentes variantes d'essais - définition du mode opératoire utilisé pour les essais croisés inter-laboratoires (phase 2)
Phase 2 Essais croisés inter-laboratoires	<p>2 compositions de béton représentatives (GT3) seront testées par les 5 laboratoires identifiés ci-avant.</p> <p>En parallèle, 2 essais de validation du mode opératoire sur des compositions XA2 et XA3 seront réalisés. A l'issue de cette phase, le mode opératoire sera arrêté pour la conduite de la phase 3.</p> <p>Livrables :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rapport sur le comportement des bétons testés - proposition à la commission de normalisation P18B/GEF8 d'une norme expérimentale
Phase 3 Caractérisation des bétons du projet	<p>5 compositions de béton représentatives (GT3) seront caractérisées à 2 âges (28 et 90 jours).</p> <p>Livrables :</p> <ul style="list-style-type: none"> - rapport sur le comportement des bétons testés

5.1.7.3 Biodégradations

Des premiers travaux ont été entrepris à l'IFSTTAR (« Essai de résistance des matériaux cimentaires aux attaques acides biogéniques ») et au CERIB (« Essai in situ accéléré de résistance à la biodégradation des matériaux en contact avec les eaux usées ») pour suivre in situ le vieillissement des matériaux cimentaires, pour définir un essai représentatif des conditions dans les réseaux d'assainissement et pour modéliser le comportement de ces matériaux. Il reste toutefois un certain nombre d'interrogations.

Les objectifs du projet sont les suivants :

- définir une approche performantielle des structures prenant en compte la spécificité des réseaux d'assainissement ;
- valider l'essai de laboratoire et l'essai in situ.

Par ailleurs, les connaissances acquises permettront de :

- modifier les normes existantes ou d'en définir de nouvelles spécifiques aux matériaux de structure des réseaux d'assainissement (tests à mettre en œuvre et choix des matériaux) ;
- définir des outils de diagnostic tels que l'utilisation de capteurs appropriés

(conditions dans les réseaux d'assainissement et évolution de la détérioration).

Plus précisément, le travail proposé ci-après permettra de :

- tester la réponse de l'essai sur plusieurs familles de matériaux cimentaires (différents types de ciment, emploi d'additions minérales) ;
- valider l'essai de laboratoire dans l'optique d'une normalisation. Dans le cadre d'une thèse (Jean Hérisson) soutenue en 2012, l'IFSTTAR a défini un essai représentatif dont il convient aujourd'hui de valider les conditions expérimentales afin de le normaliser. Cette étape nécessaire pourrait par ailleurs être réalisée dans le cadre d'une collaboration française (échange de connaissance et essais croisés) ;
- tester différents niveaux d'agression par l'H₂S en vue d'une révision des seuils d'agressivité donnés dans la norme NF FD P 18-011 ;
- modéliser l'attaque acide biogénique (depuis la présence d'H₂S jusqu'à la détérioration du matériau) sur un ensemble de formulations cimentaires.

Un modèle d'attaque acide biogénique a été défini à l'IFSTTAR en 2013 (Haifeng Yuan) qui permet de suivre la détérioration des matériaux cimentaires à base de ciment CEM I. Il convient maintenant de généraliser ce modèle à d'autres formulations et notamment aux ciments préconisés par la norme FD P18-011 (ciments au laitier, ciments avec additions, ciments sursulfatés, ciments d'aluminate de calcium... Cette modélisation reposera à la fois sur des suivis in situ, des essais de laboratoire et une compréhension des mécanismes physico-chimiques qui permettront de valider un modèle prédictif.

Phase	Contenu
Phase 1 Préliminaire	<p>Le travail proposé vise à tester 5 mortiers différents suivant les préconisations de ciments donnés dans la norme NF FD P 18-011 pour les environnements à fortes teneurs en H₂S (ciments CEM III B, CEM V, CSS et CAC). Un mortier formulé avec un ciment CEM I servira de témoin.</p> <p>Dans ce cadre, ces mortiers seront exposés :</p> <p><u>In situ :</u> Le CERIB a accès à une station d'épuration équipé d'un dispositif de suivi des conditions d'exposition et d'un dispositif d'essai. Depuis 2 ans, L'IFSTTAR a accès à deux sites français qui ont permis de classer plusieurs formulations cimentaires en fonction de leurs performances vis-à-vis de l'H₂S . Il conviendrait aujourd'hui d'avoir un autre site d'étude dédié uniquement à l'étude des 5 formulations de mortiers proposés.</p> <p><u>En laboratoire :</u> L'IFSTTAR a défini un mode opératoire (cf pièce jointe) et dispose d'une enceinte de biodétérioration adaptée qui permettra de tester les 5 formulations de mortiers dans des conditions parfaitement contrôlées.</p> <p>Livrables :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rapport sur le comportement des 5 mortiers préconisés dans les conditions d'exposition in situ et en laboratoire. - Validation du protocole de biodétérioration en laboratoire en lien avec les résultats obtenus in situ. - Recommandations de l'utilisation de ciments et d'additions minérales en complément de la norme NF FD P18-011.
Phase 2 Caractérisation des bétons du projet	<p>3 compositions de béton seront caractérisées (le GT3 proposera les compositions pertinentes au regard du type d'exposition concernée).</p> <p>Livrables :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rapport sur le comportement des 3 bétons in situ et en laboratoire.
Phase 3 Essais croisés inter-laboratoires	<p>Le CERIB et l'Ifsttar étant les seuls laboratoires en capacité de mener ces essais, il n'est pas prévu de campagne d'essais croisés.</p>

5.2 Seuils de performance admissibles (Thème 2)

5.2.1 Introduction

L'objectif de ce groupe de travail est de dégager des seuils de performance admissibles pour chaque classe d'exposition de la norme EN206-1 et pour différentes durées de vie des ouvrages.

Pour cela, plusieurs pistes existent :

- identification des paramètres de formulation (teneur en eau efficace, teneur en liant, type de liant, type de granulats...) et de confection (maturation, conditions de cure...) prépondérants sur la durabilité des matériaux cimentaires ;
- caractérisation de formules « courantes » conformes à la norme NF EN 206-1 ou au F65 ;
- exploitation d'expertises disponibles (ou à réaliser dans le cadre du PN) sur ouvrages anciens et corps d'épreuve anciens ;
- utilisation de modèles de vieillissement.

Dans l'approche performantielle « absolue », la performance est atteinte sous réserve que l'indicateur (ou les indicateurs) concerné(s) satisfait (satisfont) à un seuil préétabli, et ce pour la ou les classes d'exposition considérées. La satisfaction du seuil indique alors que le béton, dans les conditions d'environnement pré-identifiées, assure la durabilité demandée. Pour une dégradation et une durée de vie données, le seuil correspond à l'atteinte de l'état limite considéré (amorçage de la corrosion par exemple) au bout de la durée de vie envisagée. Un seuil est valable pour : une durée de vie, une classe d'exposition, un indicateur et un état limite correspondant. A noter également que le seuil de performance est valable pour un enrobage donné. Il peut enfin dépendre de la nature du béton (ciments, additions). Ainsi le couple (indicateur, seuil) est-il fondamental puisqu'il gouverne l'ensemble de la démarche.

Jusqu'à présent (LCPC, 2010) (AFGC, 2004), les seuils relatifs au processus de corrosion ont été fixés à partir de modèles ayant été alimentés en données d'entrée par des résultats d'essais réalisés sur des éprouvettes confectionnées avec un panel de bétons supposé représentatif. Bien qu'elle soit fondamentale, la fixation des seuils est complexe puisqu'elle fait intervenir plusieurs considérations :

- degré de sophistication des modèles utilisées (modèle simple ou multi-espèces, prise en compte de l'évolution des indicateurs avec le temps par exemple) ;
- domaine de validité des modèles utilisés (prise en compte des interactions des espèces agressives avec la matrice cimentaire en fonction de la nature du ciment et des additions par exemple) ;
- influence de l'échantillon de mesure : de quelle manière un indicateur de durabilité mesuré sur éprouvette peut-il être représentatif d'un indicateur mesuré à partir d'un prélèvement fait dans l'ouvrage ? ;
- comportement des bétons au jeune âge ;
- définition et connaissance des mécanismes régissant l'état limite considéré (temps d'amorçage pour la corrosion) ;
- prise en compte (ou pas) de la réserve de durabilité du béton (période séparant l'initiation de la corrosion et l'apparition de la première fissure en parement par exemple).

Ces considérations devront être prises en compte pour justifier les seuils et limiter les incertitudes associées. Le PN pourra s'appuyer sur différents travaux passés, en cours et à venir (DuraCrete, RILEM TC CTC, etc.) ainsi que sur la base de données « Indicateurs de durabilité » mise au point par l'AFGC.

Ces recherches et approfondissements sont nécessaires mais pas suffisants et devront être confirmés et complétés par un retour d'expériences du comportement réel des ouvrages dans leur environnement. Autrement dit, on propose ici non plus un calage des seuils par les données d'entrée mais un calage des seuils par les données de sorties en s'intéressant au vieillissement d'un panel d'ouvrages (ou de parties d'ouvrages) représentatif : environnement (classes d'exposition), date de construction, âge et nature du béton (formulation). A minima, le panel pourra comprendre des ouvrages vieux (70 à 100 ans) et mi-vieux (30 à 50 ans) en milieu marin et à l'intérieur des terres avec, dans chaque classe d'âge, des bétons avec CEMI, CEMII et CEMIII ; l'idéal étant que ces ouvrages aient déjà fait l'objet d'un diagnostic relatif à la corrosion.

La constitution du panel d'ouvrage sera effectuée avec les maîtres d'ouvrages / gestionnaires (ou leurs représentants) partenaires du PN. Sur les ouvrages retenus, le travail consistera notamment à déterminer les conditions d'exposition et à évaluer le degré de vieillissement du béton (évaluation des témoins de durée de vie au sens de (AFGC, 2004) : profils de pénétration des chlorures, profondeurs de carbonatation). Des prélèvements permettront également de déterminer les indicateurs de durabilité (porosité accessible à l'eau, coefficient de diffusion des chlorures, perméabilité au gaz). Des mesures électrochimiques complémentaires seront également utiles (potentiels libre, vitesse de corrosion, résistivité). La variabilité du béton en place devra être prise en compte. Connaissant l'âge du béton, son environnement, sa formulation et ses propriétés, la réactualisation des modèles de prédiction permettra de déterminer un indicateur « réactualisé » et donc de caler un seuil correspondant. Le PN pourra en partie s'appuyer sur la base de données « Indicateurs de durabilité » développée par l'AFGC ainsi que sur les travaux engagés par le SETRA sur l'estimation d'un indice de vieillissement dans le cadre des inspections ciblées.

Les résultats obtenus par ce groupe de travail, dont l'objectif principal est de servir de base à la définition de seuils de performance pour des ouvrages neufs, pourront permettre de développer une méthodologie de requalification des ouvrages anciens (les témoins de durée de vie servant à la fois à déterminer rétrospectivement l'état initial du matériau dans l'ouvrage et prospectivement son vieillissement ultérieur).

5.2.2 Identification des paramètres de formulation et de confection prépondérants sur la durabilité des bétons

Les partenaires volontaires pour s'impliquer dans cette action sont à ce jour : LMDC, Lafarge.

Les livrables attendus sont les suivants :

- Rapport de synthèse sur l'exploitation des bases de données disponibles
- Proposition de modèles reliant les paramètres de formulation aux grandeurs associées à la durabilité

5.2.2.1 Exploitation de la base de données « Indicateurs de durabilité » développée par l'AFGC

Un groupe de travail AFGC a lancé la mise en œuvre d'une base de données des indicateurs de durabilité et des témoins de durée de vie. Cette base de données doit regrouper l'ensemble des données disponibles sur la valeur des indicateurs de durabilité et des témoins de durée de vie en fonction des paramètres de formulation et de confection des bétons. L'objectif est de synthétiser les résultats obtenus afin d'identifier des seuils pour chaque classe d'exposition. Une réflexion sur le lien entre les paramètres de formulation et les valeurs des indicateurs de durabilité sera alors engagée pour exploiter le comportement des constituants sur les différents indicateurs de durabilité.

Cette approche sera étendue aux essais de performance accélérés. Il s'agit d'étudier la possibilité de définir des valeurs « seuils » pour les essais tels que l'essai de carbonatation accéléré correspondant aux 4 classes XC, dans l'objectif de pouvoir utiliser l'essai accéléré dans une approche performantielle « absolue » (et non uniquement comparative avec la notion d'équivalence de performance). L'étude des corrélations entre vitesse de carbonatation accélérée et vitesse de carbonatation naturelle (pour les 4 XC) pourrait permettre d'établir des valeurs « seuils » sur la vitesse de carbonatation accélérée.

Cette approche pourrait s'appliquer aux essais accélérés de dégradations chimiques.

5.2.2.2 Exploitation des résultats obtenus sur les bétons caractérisés dans le cadre du Projet National

La plupart des seuils disponibles à l'heure actuelle ont été déterminés sur bétons à base de CEMI. Il convient de lancer une campagne d'essais sur des bétons contenant des additions minérales.

L'étude de l'influence d'autres paramètres liés en particulier aux granulats serait pertinente : forme des granulats, nature minéralogique, teneur en fines, coefficient d'absorption.

Il s'agit d'étendre le domaine de validité des seuils à une large gamme de bétons. Le choix des bétons sera fait selon les dispositions du §5.3 puis ils seront testés selon les modalités du §5.1. Ces résultats viendront compléter la base de données AFGC « Indicateurs de durabilité ».

5.2.2.3 Modèles reliant les paramètres de formulation et de confection aux indicateurs de durabilité

D'autre part, des modèles seront proposés reliant les paramètres de formulation du béton aux valeurs des indicateurs de durabilité et des essais de performance.

Enfin, dans une démarche performantielle et prédictive, la construction de lois de distribution statistiques est fondamentale : elles permettent d'alimenter les outils probabilistes couplés aux modèles physiques faisant appel aux indicateurs de durabilité. La connaissance de seuils pour chaque classe d'exposition, mais aussi des lois de distribution, pourrait permettre de proposer des coefficients de sécurité sur les indicateurs de durabilité.

Cette partie du travail découle directement de l'exploitation de la base de données AFGC Indicateurs de durabilité.

5.2.3 Calage des seuils sur ouvrages anciens et corps d'épreuve

Les partenaires qui sont volontaires pour s'impliquer dans cette action sont à ce jour les suivants : IFSTTAR, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques LMDC, LaSic, GeM, CEREMA, CERIB, LAFARGE, LERM.

Les livrables attendus sont les suivants :

- Rapports d'expertise sur chacun des ouvrages anciens auscultés
- Proposition de méthodologie pour déterminer a posteriori les grandeurs associées à la durabilité des bétons lors de leur mise en œuvre
- Proposition de seuils de performance en fonction des conditions d'exposition

5.2.3.1 Corps d'épreuve anciens : BHP2000

Dans le projet national BHP2000, le comportement de 15 bétons a été étudié sur des éprouvettes conservées en laboratoire et sur des éléments de structure exposés à des conditions naturelles (in situ). A cet effet, 43 corps d'épreuve en béton armé (pré-fissurés sur une face) ont été installés sur quatre sites de vieillissement naturel : Melun (Seine-et-Marne), La Rochelle (Charente-Maritime), la Maurienne (Savoie) et le Canada (Université Laval, Québec).

Les corps d'épreuve caractérisés à l'état initial ont ensuite été expertisés à 2, 4 et 10 ans. Il est prévu dans le cadre du PN de faire un point de caractérisation à 15 ans. Dix bétons sur les 15 initialement fabriqués seront testés. 40 carottes seront prélevées sur les corps d'épreuve stockés à Melun, 60 carottes sur les corps d'épreuve en Savoie et 60 carottes sur les corps d'épreuve à La Rochelle soit un total de 160 carottes (qui permettront de quantifier les témoins de durée de vie. La dimension des carottes à prélever et leur position sur les corps d'épreuve restant doit faire l'objet d'une procédure pour optimiser les essais et leur exploitation.



Figure 1 – Vue générale d'un corps d'épreuve

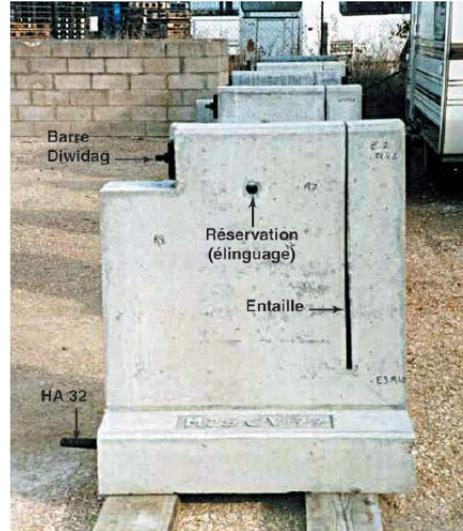


Figure 2 – Vue de côté d'un corps d'épreuve

5.2.3.2 Ouvrages anciens

Il existe de nombreux ouvrages dans des environnements donnés. Pour certains (peu !) on dispose de l'ensemble des données à savoir indicateurs de durabilité initiaux et suivi des indicateurs au cours du temps. Il faut les recenser et les analyser. Ces ouvrages sont en général récents (moins de 20 ans).

Pour d'autres, on ne dispose souvent que de la formulation et la résistance mécanique. Pour ces derniers, il faudrait faire des prélèvements et à partir de la base de données AFGC retrouver les valeurs des indicateurs de durabilité pour des formulations voisines. Il faudrait s'intéresser à des ouvrages anciens (en balayant les tranches d'âges – a priori 25, 50 et 100 ans) qui ont (si possible) un dossier d'ouvrage bien documenté (dans lesquels on puisse trouver des informations sur les formulations de béton effectivement utilisées), qui se trouvent dans des environnements variés (carbonatation seule, chlorures, carbonatation + chlorures, gel-dégel...) et ont été réalisés avec des ciments variés (CPA, CPAL, ciment avec CV...). Pour chacun de ces ouvrages, il conviendra de pratiquer deux types d'intervention:

- diagnostic de l'état du béton armé avec la panoplie complète des techniques d'auscultation : enrobage, pénétration des Cl⁻, profondeur de carbonatation, potentiel d'électrode, vitesse de corrosion, résistivité, perméabilité à l'air, absorption d'eau... ;
- prélèvement de carottes avec mesures des indicateurs de durabilité : perméabilité au gaz, porosité, diffusion des chlorures, teneur en portlandite, analyse minéralogique complète du béton pour notamment identifier les constituants et la formulation...

L'idéal serait d'intervenir sur des ouvrages qui ont déjà fait l'objet de diagnostic de corrosion complet.

Dix ouvrages seront retenus en plus des corps d'épreuve de BHP2000.

Deux catégories d'ouvrages ont été identifiés: ceux pour lesquels il faut réaliser des prélèvements (la majorité) et ceux pour lesquels il faut compiler et exploiter des données déjà obtenues. D'autre part les ouvrages seront classés en fonction de leur âge en trois catégories : moins de 20 ans, entre 20 et 50 ans, plus de 50 ans.

Sur chaque ouvrage identifié, il convient au préalable de lister les paramètres suivants qui permettront de valider les choix d'ouvrages anciens sélectionnés :

- l'accessibilité et l'accord du maître d'ouvrage pour réaliser les essais et prélèvements;
- les données déjà disponibles sur les ouvrages ;
- la caractérisation du béton à l'état durci ;
- les résistances mécaniques ;
- le ou les types d'environnement passé et présent ;
- les indicateurs de durabilité : porosité à l'eau, perméabilité au gaz, migration des ions chlorure, absorption d'eau et si possible la porosimétrie mercure, la résistivité, absorption d'eau par capillarité, perméabilité à l'eau ;
- les témoins de durée de vie : profondeur de carbonatation, profil de chlorures et de sulfates (en fonction du type d'ouvrage), mesure de profondeur d'enrobage, mesures de potentiel d'électrode et de vitesse de corrosion ;
- l'analyse de la microstructure : profil ATD/ATG, micro-sonde ou analyse EDS ;
- les caractérisations visuelles nécessaires : fissuration, épaufrures...

Il est prévu la rédaction d'une procédure d'auscultation et de prélèvement (en surface ou à cœur pour l'ensemble des essais listés ci-dessus, nombre de prélèvements, diamètre des carottages...), de conservation (a priori dans un sac hermétique) et d'acheminement des carottes. Pour les essais à réaliser, la référence sera celle du groupe de travail du Thème 1.

Une première liste des ouvrages potentiellement sélectionnable est proposée :

1. Catégorie des ouvrages de moins de 20 ans. Ces bétons sont très proches des bétons actuels en termes de constituants et dosages, mais leur durabilité n'est pas encore prouvée.
 - Vasco de Gama (pas d'essais à réaliser, uniquement de l'exploitation), XS – LERM
 - Rion (pas d'essais, uniquement de l'exploitation), XS - LERM
 - BHP2000 (batterie d'essais complète à réaliser et exploitation des essais précédents), XC-XS-XF - IFSTTAR
 - Viaduc de Compiègne (ouvrage récent, carbonatation uniquement), XC
 - Digue de Calais (batterie d'essais complète), XS
2. Catégorie des ouvrages entre 20 et 50 ans. Ces bétons s'éloignent des bétons actuels mais leur durabilité est plus facile à évaluer :
 - Ile de Ré (batterie d'essais complète), XS – IFSTTAR
 - Viaduc de la Ricamarie (batterie d'essais complète), XC
 - Pont sur la Rance (pas d'essais, uniquement de l'exploitation), XC ou XS
 - Pont sur le Scorff (pas d'essais, uniquement de l'exploitation), XC
 - Quai des TCD, XS
 - Viaduc de la Douffine, XC
 - Pont Saint Nazaire, XS
3. Catégorie des ouvrages de plus de 50 ans. Ces bétons sont essentiellement à base de clinker. Les ciments sont plus grossiers et plus riches en C2S qu'aujourd'hui. Ces bétons sont formulés sans adjuvantation, avec des E/C élevés mais le recul donne une bonne idée de leur durabilité. Ces ouvrages relèvent pour la plupart des monuments Historiques :
 - Eglise Notre-Dame de Royan (pas d'essais, uniquement de l'exploitation) XC

- Pont Camille de Hogues, Châtelleraut (pas d'essais, uniquement de l'exploitation) XC
- Eglise Notre-Dame du Raincy (pas d'essais, uniquement de l'exploitation)
- Palais d'Iéna (essais à réaliser) : XS XC XA
- Hôtel de ville Boulogne-Billancourt (essais à réaliser) : XC
- Cité Radieuse de Marseille (pas d'essais, uniquement de l'exploitation) – XC XS
- Eglise Saint-Joseph du Havre (pas d'essais, uniquement de l'exploitation) – XC XA

Cette liste est très large et seule une partie des ouvrages sera sélectionnée. En analysant ce bilan, on peut constater qu'il n'y a pas d'ouvrage en environnement classé XF : une recherche d'ouvrage visant à compléter notre panel est en cours.

5.2.3.3 Lancement d'une campagne d'étude du vieillissement naturel sur corps d'épreuves

Nous prévoyons de lancer une nouvelle campagne d'étude du vieillissement naturel sur corps d'épreuve dans le même esprit que celle de BHP2000.

Le choix des formulations se fera au sein des bétons définis par le groupe de travail du Thème 3 et le coulage sera assuré par ce groupe de travail. Le nombre et la taille des corps d'épreuve seront définis en collaboration entre les thèmes 2 et 3. L'identification des sites de stockage doit permettre de couvrir les classes d'environnements de la norme EN-206. Quatre environnements ont été identifiés et les lieux de stockage sont à valider en particulier avec les maîtres d'ouvrage concernés :

- XC : région parisienne,
- XS : Port de La Rochelle,
- XF : Mont Aigoual,
- XA : station d'épuration à identifier et/ou à proximité d'un sol gypseux en région parisienne.

Les bétons sains seront caractérisés par le groupe de travail du Thème 1. Les dégradations sur la durée de vie du projet PERFDUB seront assurées au sein du groupe de travail du Thème 2 et nous prévoyons aussi un suivi au-delà du projet national sur le modèle de ce qui s'est fait pour BHP2000. Une procédure de suivi sera rédigée.

5.2.3.3.1 Corrosion des armatures

La première cause de dégradation des structures en béton armé est la corrosion des armatures qui peut survenir soit en milieu carbonaté soit en milieu chloruré.

Aujourd'hui, dans un contexte de prédiction de durabilité, la corrosion ou plutôt le RISQUE de corrosion est associé à des phénomènes de "transferts" qui sont étudiés dans une matrice cimentaire qui représente le béton d'enrobage pollué (les éprouvettes ne contiennent pas d'armature). Dans le cas de la pollution par carbonatation, les études de transfert ont permis une meilleure connaissance du front de carbonatation, de son diagnostic, de sa cinétique et de sa simulation numérique. Dans le cas de la pollution par des ions chlorures, les études de transfert ont permis de mieux connaître la pénétration de ces ions au sein du matériau cimentaire (essentiellement diffusion) en prenant en compte les ions chlorures totaux, les ions chlorures libres et par conséquent les ions chlorures piégés, et ce, de manière quantitative. Elles ont également permis de proposer

des simulations numériques. Pour citer un exemple, connaître le coefficient de diffusion des ions chlorures dans telle ou telle formulation de béton permet de prédire le temps qu'il faudra pour que ces ions atteignent les armatures situées à tant de centimètre de la peau du béton. L'idée est la suivante : plus ce temps sera long et plus la corrosion sera retardée.

Les résultats des études de "transfert" sont repris pour prédire la durabilité des ouvrages en béton armé (conception mais également gestion du parc existant) dans l'approche par les indicateurs de durabilité et dans le développement d'outils numériques tels que STADIUM® par exemple.

Toutefois, cette approche "transfert" manque cruellement de validation en ce qui concerne la véritable corrosion des armatures dans le béton. Pour citer deux cas extrêmes :

- le béton contient des ions chlorures en concentration suffisante pour que la corrosion survienne mais cette dernière ne se produit pas (pas assez d'humidité par exemple) ;
- la formulation de béton contient des espèces oxydo-réductrices qui peuvent générer un courant alors que le béton n'est pas pollué. Même dans le cas le plus étudié de la corrosion d'acier dans une matrice cimentaire chlorurée, la concentration d'ions chlorures pour amorcer une corrosion fait encore débat. A noter, le groupe RILEM TC CTC Corrosion initiating chloride threshold in concrete qui travaille sur les conditions et les paramètres de l'initiation de la corrosion.

Dans le récent projet ANR Applet, les études de corrosion de bétons armés sains ou pollués (soit par de la carbonatation soit par des ions chlorures (introduits lors du gâchage ou par immersion/séchage)) en fonction du temps ont montré que l'oxydation de l'armature n'est pas exclusivement liée aux propriétés du matériau béton mais pour une part importante à son environnement et notamment la température et l'humidité. De plus, la cause à effet n'est pas inéluctable : les chlorures peuvent être présents et malgré tout la corrosion peut ne pas se produire. Enfin, la corrosion reste un phénomène "stochastique" : sur 5 éprouvettes identiques étudiées, le phénomène de corrosion ne survient pas toujours au même moment... Les résultats de ces études ont également apporté des éléments de réponse quant à la cinétique de la corrosion.

En ce qui concerne les outils de diagnostic de la corrosion, les caractérisations électrochimiques (mesures de potentiel libre, de résistance de polarisation linéaire et d'impédance pour conduire au calcul des courants de corrosion) sont bien définies pour des bétons à base de ciment Portland. En revanche, pour des bétons à base de ciment avec ajouts (laitiers par exemple), ces mesures doivent encore être éprouvées.

Dans ce contexte, il semble important de valider l'approche "transferts" en vérifiant sous quelles conditions on passe d'une situation où les agents agressifs ont atteint les armatures à une situation de corrosion avérée.

Cette proposition vise à étudier le comportement en corrosion de corps d'épreuve en béton armé, en fonction, d'une part, de la nature du ciment et des additions, et, d'autre part, des conditions environnementales (couple température / humidité). Le suivi de la corrosion des armatures sera réalisé de deux manières :

- par la réalisation de caractérisations électrochimiques sur les armatures du béton avec des matériels de laboratoire et de chantier (GECOR, Galvapulse). Les mesures seront faites depuis le parement béton ;
- par l'acquisition et le traitement des signaux issus de capteurs "noyés" dans les dalles en béton armé avant le coulage. Il s'agit d'instrumenter les corps d'épreuve afin de proposer et de valider des capteurs de détection de corrosion dans un but de suivi prédictif.

En ce qui concerne le vieillissement naturel extérieur, on pourra appliquer à des compositions de référence (cf. §5.3) une démarche analogue à celle mise en œuvre dans BHP2000.

5.2.3.3.2 *Attaque par le gel et les sels*

Certains des corps d'épreuve destinés au suivi de la corrosion seront exposés en zone de gel modéré et de gel sévère, avec une face soumise aux sels de déverglaçage. Leur dégradation éventuelle fera l'objet d'examens périodiques et sera comparée aux valeurs obtenues concernant les indicateurs de durabilité et les essais de résistance au gel et à l'écaillage.

5.2.3.3.3 *Attaques chimiques*

Afin de pouvoir vérifier la représentativité des essais accélérés, des corps d'épreuve seront exposés en laboratoire en conditions de vieillissement pseudo-naturel (non accéléré) par immersion dans des solutions chimiquement agressives (sulfates, acides).

Pour ce qui concerne les attaques par le H₂S, on étudiera le comportement de corps d'épreuve à l'essai accéléré « in situ » développé par le CERIB en parallèle avec les résultats de l'essai accéléré de laboratoire. Des corps d'épreuve seront également exposés dans différents réseaux d'assainissement et stations d'épuration pour lesquels les données « température – humidité relative – teneur en H₂S » pourront être suivies.

5.2.4 **Modélisation**

Les partenaires qui sont volontaires pour s'impliquer dans cette action sont à ce jour les suivants : IFSTTAR, LMDC, LaSie, GeM, CEREMA, CERIB, LAFARGE, LERM.

Le travail sera concentré sur les environnements conduisant à la corrosion des aciers mais une incursion est également prévue dans le domaine des attaques chimiques (classes XA). Pour ce dernier point, on se référera en annexe 4 à la description des thèmes de recherche fondamentale correspondants.

En ce qui concerne la corrosion des aciers, nous nous intéresserons à la carbonatation et à la pénétration des chlorures avec prise en compte de l'état hydrique du matériau qui est un aspect indispensable à appréhender lorsqu'on s'intéresse à ces deux types d'agression.

Le travail consistera d'une part en la sélection de modèles de vieillissement pertinents vis-à-vis de l'application de l'approche performantielle (les données d'entrée doivent en effet être cohérentes avec les indicateurs de durabilité). L'utilisation de ces modèles de vieillissement devra in fine permettre de confirmer ou de redéfinir les seuils obtenus en modélisant le comportement de bétons pour différents environnements (nature de l'agression, conditions

hygrométriques, etc.). Afin que l'approche performantielle gagne en souplesse, l'objectif sera également de proposer une modulation des seuils en fonction de l'épaisseur d'enrobage et de la durée de vie escomptée de la structure en béton armé. Une telle démarche offrira de plus l'opportunité d'adapter la méthodologie pour des formules de béton sortant de l'ordinaire tels les bétons auto-plaçants présentant généralement un fort dosage en pâte cimentaire ou les bétons de granulats légers, ainsi que pour des compositions à caractère environnemental incluant par exemple des granulats recyclés.

Le choix de modèles qualifiés comme pertinents sera effectué sur la base d'un « benchmark » en aveugle portant sur les modèles sélectionnés dans la bibliographie (cf. §5.2). Cette confrontation se fera sur la base d'un premier jeu de données d'entrée permettant ainsi de préciser collectivement les données d'entrée nécessaire pour chaque modèle testé. Cette première phase devra se faire avec des bétons dont les formulations sont conformes aux critères prescriptifs.

Les résultats expérimentaux seront obtenus sur bétons, à la fois pour des conditions de laboratoire et des conditions in situ. Pour cela nous disposerons de plusieurs campagnes d'essai portant sur une large gamme de bétons. Il s'agit :

- des résultats menés en laboratoires (généralement pour des conditions accélérées) permettant d'étudier finement (à partir des profils de pénétration, du suivi de l'évolution de la microstructure ou de l'état hydrique, etc.) la capacité du modèle à décrire le mécanisme de dégradation étudiée. Il existe dans la littérature et auprès des partenaires du projet national proposé une quantité importante de données expérimentales qui pourront être exploitées (on peut citer en particulier les données du projet de recherche Applet) ;
- des données issues de sites d'exposition naturelle afin d'étudier la capacité du modèle à retranscrire des situations réelles, notamment dans le cas de formules de béton à caractère environnemental :
 1. Résultats de l'échéance à 15 ans du projet BHP2000 (il s'agira de proposer un diagnostic poussé à cette échéance en suivant le même principe que le diagnostic réalisé à $t=0$ et à 4 ans).
 2. Suivi du comportement d'ouvrages anciens par le LNEC (cas du pont Vasco de Gama).
 3. Données du projet BEFU (projet sur la formulation des bétons dits « verts », financé par la région Ile-de-France de 2007 à 2010, pilotage par l'IFSTTAR. Les résultats disponibles portent essentiellement sur la carbonatation).

A l'issue de cette première phase du « benchmark », une validation collective du format des données d'entrée et de sortie sera effectuée. Ensuite nous sélectionnerons un plus large panel d'ouvrages anciens pour lesquels nous disposons des données nécessaires à la fois en entrée et en sortie. Une mise en forme de ces données sera nécessaire avant envoi aux laboratoires concernés.

Les données de sortie seront collectées et permettront de sélectionner les modèles les plus pertinents. Les modèles qui seront retenus devront fournir une prédiction acceptable du mécanisme de pénétration de l'agent agressif considéré, mais être suffisamment également souples d'emploi, c'est-à-dire nécessitant des données d'entrée accessibles. De plus, ils seront utilisés afin de vérifier ou faire évoluer les seuils d'indicateurs de durabilité proposés à ce jour.

Nous considérerons à la fois des modèles semi-analytiques de type ingénieur et des modèles numériques plus raffinés qui pourront être « dégradés » pour en simplifier l'emploi. Par exemple, un modèle de carbonatation nécessite généralement la connaissance de la courbe de sorption (désorption et adsorption en toute rigueur) du matériau qui relie l'humidité relative à sa teneur en eau liquide. Cette donnée est délicate à obtenir, d'autant plus qu'elle dépend fortement de l'état d'hydratation de la matrice et qu'elle évolue au cours du

processus de carbonatation lui-même. Il sera possible ce faisant de proposer une estimation de cette courbe à partir soit des bases de données existantes, soit d'un modèle annexe simplifié qui permet de la construire. Les modèles retenus pourront dans un second temps être probabilisés afin de tenir compte de la variabilité qui pèse sur les données d'entrée. La dispersion statistique pourra par exemple être déduite des données expérimentales issues du projet Applet (ANR Applet 2012). Une prédiction en termes d'évolution de l'indice de fiabilité au cours du temps sera proposée pour les bétons du « benchmark ». A partir de l'indice de fiabilité seuil fixé par les normes ou recommandations en termes d'état limite de durabilité, une prédiction de la durée de vie sera alors possible. Les modèles sélectionnés seront ainsi comparés dans un cadre fiabiliste afin de mettre en évidence leurs écarts de sensibilité vis-à-vis des valeurs moyennes des données d'entrée du modèle (matériau, environnement, mise en œuvre) et de leur dispersion.

Si cela est possible compte tenu de la complexité des mécanismes en jeu, on privilégiera les modèles en mesure de tenir compte des couplages (carbonatation/hydrique, chlorures/hydrique, voire carbonatation/chlorures/hydrique) et des effets de peau qui ont tendance à affaiblir la durabilité de la zone d'enrobage. Les bases de données expérimentales correspondant à des conditions d'exposition naturelle caractérisées par des variations hygrométriques et des états de cure non optimisés, les modèles qui ne seront pas en mesure d'intégrer ces couplages seront mis en défaut.

Il conviendra également dans cette partie d'étudier l'influence de l'âge du béton au moment de l'essai de caractérisation des indicateurs de durabilité (en cohérence avec les données d'entrée du modèle) sur les résultats de prédiction. Des lois de variation des indicateurs de durabilité en fonction de l'état de maturité du béton pourront être proposées, si cela est jugé pertinent, compte tenu de la sensibilité du modèle au paramètre de durabilité considéré. De façon plus générale, l'évolution du béton avec le temps doit être évaluée et prise en compte dans les modèles de vieillissement : ceci est d'ailleurs décrit dans le FprCEN/TR 16563 - *Principles of the equivalent durability procedure* (février 2013) comme l'*ageing effect* (facteur de vieillissement).

Les modèles actuels pourront faire l'objet d'améliorations portant sur :

- la détermination du coefficient de diffusion du CO₂ ;
- la prise en compte différenciée de la structure poreuse de la pâte cimentaire et de celle des granulats ;
- l'impact des paramètres de mise en œuvre ;
- la prise en compte d'un état-limite de corrosion.

Ces thèmes sont repris en annexe 4 dans le cadre de proposition de recherche complémentaire à caractère plus fondamental.

Les modèles finalement sélectionnés seront utilisés pour :

- le choix des essais de performances et indicateurs de durabilité ;
- l'intégration des incertitudes de mesure liées aux essais et modes opératoires ;
- la détermination des seuils associés aux indicateurs et essais de performance ;
- la prise en compte de la variabilité des propriétés de durabilité du béton.

Les livrables attendus sont les suivants :

- Sélection de modèles de vieillissement des ouvrages en béton
- Proposition de seuils de performance associés aux conditions d'exposition

- Détermination de critères d'acceptabilité des résultats obtenus pour les grandeurs associées à la durabilité aux différents stades d'un projet

Pour finir, le groupe de travail s'engage dans une démarche pédagogique vis-à-vis des professionnels du BTP visant à les informer sur les limites des modèles utilisés et la hiérarchie des paramètres d'entrée.

5.3 Bétons à étudier – Bétons de référence (Thème 3 – première partie)

5.3.1 Introduction et objectifs

Dans ce thème, on s'attachera à définir les formulations de béton à étudier dans le cadre du projet de façon à fournir aux différents laboratoires les échantillons permettant de mener à bien les expérimentations sur éprouvettes et sur corps d'épreuve. La caractérisation de ces formulations permettra d'orienter les choix des bétons de référence dans l'approche comparative et le choix des seuils de performance admissibles pour l'approche absolue.

Le choix des bétons de référence constitue un élément clé dans l'approche performantielle comparative, le béton à qualifier étant validé dès lors que ces performances de durabilité sont au moins aussi bonnes que celles du béton de référence. Il est donc fondamental de préciser les modalités de définition des bétons de référence relatifs aux différentes classes d'exposition afin d'assurer que la marge de sécurité correspondante est satisfaisante. Cela passe par une analyse des retours d'expérience et dispositions normatives retenues jusqu'à ce jour, ainsi que par l'utilisation de modèles prédictifs.

L'objectif est d'établir des règles permettant d'optimiser le choix du béton de référence (approche performantielle comparative) en fonction des classes d'exposition, de la durée d'utilisation de projet, des types de ciment et additions utilisés, et des enrobages d'armature retenus.

5.3.2 Gamme de formulations

Il s'agit de définir un panel de formulations, destiné à subir les essais de durabilité définis précédemment, permettant à la fois de tester la sensibilité des essais de durabilité et d'optimiser la définition des bétons de référence en fonction des classes d'exposition considérées.

L'approche performantielle vise notamment à favoriser les formules de bétons durables à faibles impacts environnementaux et d'une manière générale à contribuer à l'optimisation des formules en s'appuyant sur les différents essais de durabilité. Il convient donc d'approfondir la réponse à ces essais des bétons pour lesquels on dispose d'un moindre retour d'expérience, par exemple : avec CEMIII, CEMV, bétons à forte teneur en additions, bétons ayant une matrice cimentaire à très faible teneur en calcium (comportement vis-à-vis de la carbonatation), bétons à fort volume de pâte (BAP).

Il est prévu de définir un panel de 30 à 40 formulations en faisant varier les paramètres suivants, qui sont identifiées comme prépondérants vis-à-vis de la durabilité :

- rapport $E_{eff}/Liant$ éq. ;
- nature du liant ;
- volume de pâte ;

- type de granulats (en particulier : porosité).

Parmi ces formulations, la majorité sera conforme à une des classes d'exposition de la norme selon les tableaux NA.F et l'on étudiera spécifiquement des formulations en dehors de ce champ du point de vue par exemple de la composition du liant ou de la nature des granulats.

En outre, on analysera particulièrement pour les classes XF l'influence de la teneur en air occlus.

En phase de montage, une première définition du panel de formulations à tester a été définie et est détaillée en annexe 3. La sélection finale des formulations de ce panel constitue le premier livrable du thème 3 et conditionne toute la suite du projet.

5.3.3 Perspectives de recherche

Les objectifs de la recherche sur les bétons de référence sont les suivants :

1. Dans la mesure où l'on souhaite, par cette nouvelle approche, viser une durabilité globalement meilleure, il est nécessaire de disposer d'un point de comparaison, donc de réaliser une photographie de la durabilité potentielle des bétons actuels, par classe d'exposition et à l'aide des essais retenus ou développés.

L'on pourra s'appuyer sur des bases de données existantes, complétées par des essais ciblés. Le programme expérimental aura recours à la technique des plans d'expérience, afin d'évaluer les effets croisés des paramètres de composition.

2. Quelle que soit la méthodologie retenue pour appliquer le *Concept de performance équivalente*, il sera nécessaire de prendre en compte la variabilité, afin de garantir le seuil résultant du choix du béton de référence. En particulier, dans cette méthodologie comparative, il est nécessaire de définir l'exploitation des résultats d'essais performantiels en fonction du nombre de résultats d'essais par béton.

Pour des essais bien identifiés, par exemple la porosité accessible à l'eau et le coefficient de diffusion apparent des chlorures, des études statistiques porteront sur quelques bétons :

- dans des domaines de composition bien connus (dans lesquels pourraient se situer des bétons de référence),
 - des bétons modernes,
 - des bétons sortant des domaines courants, par exemple : forts taux d'additions, BHP, granulats poreux, dosages en fines élevés.
3. Il s'agit également d'établir des critères sur le béton de référence et le béton à qualifier en fonction de plusieurs scénarios d'application du concept de performance équivalente et de la destination du béton.
 4. Les travaux portant sur la modélisation (voir §6.2.4.) seront exploités pour la définition des bétons de référence, en particulier ils permettront de quantifier la marge de sécurité sur la performance par rapport aux limites admises par l'approche prescriptive (tableaux NA.F. de la norme NF EN 206-1/CN).

5.4 Prise en compte de la variabilité (Thème 3 – deuxième partie)

5.4.1 Généralités

Aujourd'hui les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression et au fendage sont prises en compte dans la norme NF EN 206-1 de manière probabiliste¹. Le système développé a pour objectif de maîtriser les valeurs de résistances caractéristiques (avec un fractile de 5 %) et non les seules valeurs moyennes.

De manière analogue, l'approche performantielle de la durabilité devrait permettre à terme d'avoir un même niveau de garantie. Il est donc nécessaire de définir des règles permettant d'avoir une approche probabiliste adaptées aux spécificités des propriétés de durabilité mesurées.

En comparaison des résistances mécaniques, les propriétés de durabilité font généralement appel à des modes opératoires plus longs et plus complexes. Il paraît difficile d'envisager de devoir réaliser un nombre important d'essais pour appréhender la dispersion naturelle d'une propriété de durabilité pour un béton donné. Une des questions qui se pose est donc de savoir comment on peut être certain du fait que la probabilité d'avoir un béton non conforme n'est pas supérieure ou bien à une valeur définie (5 % par exemple comme pour les résistances mécaniques) ou à la probabilité déjà admise (bien que non définie) implicitement dans la norme NF EN 206-1 et cela à partir d'un nombre d'essai limité. Cela revient à s'intéresser à la valeur caractéristique (fdk) des propriétés de durabilité.

Dans le cas d'une approche comparative, il s'agit de vérifier que la valeur caractéristique de la propriété de durabilité étudiée du béton à qualifier n'est pas plus élevée (cas d'une propriété pour laquelle une faible valeur est synonyme de plus grande durabilité, porosité par exemple) que celle d'un béton dont l'utilisation est possible selon la norme NF EN 206-1. Pour réaliser cette comparaison, deux méthodes pourraient être utilisées :

- la réalisation d'un nombre important de gâchées et de caractérisation afin de tracer l'histogramme de répartition des valeurs ;
- la réalisation d'un nombre limité de gâchées et le choix d'un béton de référence qui intègre en lui-même ce volet probabiliste.

La première méthode, certes pertinente d'un point de vue théorique, apparaît difficile à mettre en œuvre sur le plan pratique compte tenu des délais de réalisation et du coût qu'elle induirait. Elle pourrait éventuellement être réservée à des ouvrages exceptionnels.

Quant à la deuxième méthode, elle nécessite d'une part d'estimer les coefficients de variation liées aux propriétés de durabilité étudiées et d'autre part d'être en mesure de pouvoir positionner le béton réalisé en laboratoire parmi l'ensemble des bétons qui pourraient être réalisés sur la base de la même composition nominale. Ce dernier point constitue la principale difficulté de l'approche. Il n'y a en effet pas de raison que les gâchées réalisées en laboratoire correspondent toujours précisément aux bétons possédant des caractéristiques moyennes.

Que l'approche performantielle de la durabilité soit de type absolu (acceptation d'un béton à qualifier en fonction de ses propriétés au regard de valeurs seuil) ou bien comparatif (acceptation d'un béton à qualifier en fonction de ses propriétés comparativement à celles

¹ Recommandations du projet Applet « Durée de vie des ouvrages en béton armé – Approche prédictive, performantielle et probabiliste »

d'un béton de référence), il apparaît nécessaire de définir une méthodologie qui intègre les difficultés évoquées précédemment par des approches probabilistes.

Il est nécessaire en particulier d'apporter des réponses aux questions concernant les modalités de validation d'une composition dans la phase d'étude en laboratoire :

- comment intégrer la variabilité des caractéristiques des bétons en fonction des gâchées ?
- comment prendre en compte l'incertitude inhérente aux modes opératoires ?

Les réponses à ces questions constituent les livrables attendus pour cette deuxième partie du Thème 3.

5.4.2 Variabilité spatiale et temporelle

La démarche proposée reprend celle adoptée dans le projet ANR Applet, GT1-1 : Acquisition de données sur fabrication réelle, en complétant les données correspondantes (élargissement de la gamme de bétons testés, acquisition de données complémentaires relatives à la carbonatation et à la perméabilité au gaz).

Ce sujet aura pour missions de définir les chantiers sur lesquels les prélèvements de matériau seront réalisés, de confectionner les corps d'épreuve, et de définir les conditions de ventilation des éprouvettes. Deux chantiers seront sélectionnés pour mettre en œuvre sur une durée d'au moins 12 mois du béton ordinaire vibré pour l'un et du béton d'ouvrage d'art pour l'autre. Des prélèvements mensuels seront réalisés sur une année pour apprécier la variabilité temporelle. Sur chacun de ces chantiers, l'entreprise prend en charge la confection des éprouvettes, le contrôle du béton frais (consistance), la collecte des bons de pesée et de la supervision de la conservation sur chantier. Chaque série est rapatriée dans le laboratoire de l'entreprise pour conservation en conditions normalisées pendant 14 à 21 jours puis envoyée aux laboratoires partenaires.

Sur les deux chantiers, un voile expérimental de 2,5 m x 2,5 m x 0,3 m sera bétonné et destiné à une série d'environ 20 carottages qui seront envoyés aux laboratoires (pour évaluation de la variabilité spatiale).

L'ensemble des essais envisagés, la ventilation de ces éprouvettes entre laboratoires et le calendrier de remise des corps d'épreuve seront définis dès le début du projet.

Les résultats obtenus permettront de compléter ceux issus du projet de recherche ANR Applet et de fournir les données d'entrée nécessaires à la modélisation.

5.4.3 Essais de contrôle

L'évaluation de la conformité du béton vis-à-vis de la durabilité doit s'appuyer sur des essais de contrôle qui sont à définir pour les différentes classes d'exposition considérées. Outre les essais de résistance mécanique, des essais simples associés de type résistivité, porosité ou absorption d'eau sont à considérer.

5.5 Contractualisation de l'approche (Thème 4)

Pour le développement de l'approche performantielle, il est important de définir les responsabilités et engagements des différents acteurs et en particulier de préciser le cadre contractuel approprié pour son application.

Cette approche doit pouvoir s'appliquer non seulement aux longues durées de vie, mais aussi à des durées de vie plus courtes pour répondre aux besoins des marchés et optimiser le coût des ouvrages.

Elle doit également permettre de développer l'utilisation de matériaux à faible impact environnemental et de diminuer corrélativement les impacts environnementaux des ouvrages :

- utilisation de matériaux recyclés (liaison avec le Projet National RECYBETON – www.pnrecybeton.fr) ;
- utilisation d'additions ;
- optimisation des dosages en liant.

En outre, une optimisation aussi bien économique qu'environnementale pourra être atteinte via une adéquation des performances mécaniques à une échéance donnée aux besoins réels de l'ouvrage.

Il sera nécessaire d'établir un état des lieux de la réglementation et de la normalisation, en France et à l'étranger et un bilan des retours d'expérience disponibles sur des projets de construction.

Le sujet de la responsabilité des différents acteurs devra être traité, la participation des bureaux de contrôle et assureurs devra être recherchée

Le groupe de travail en charge de ce thème devra préciser les objectifs du projet, et, en étroite collaboration avec le CST, suivre les actions en vérifiant qu'il disposera des éléments nécessaires à la rédaction de recommandations globales sur le sujet et synthétiser les résultats, il s'assurera notamment que les travaux des autres groupes permettent de répondre à cette interrogation en intégrant les divers volets de l'approche contractuelle :

- les définitions des critères et des objectifs ;
- la méthodologie de mise au point de la formule phase préalable ;
- le suivi et les contrôles : Besoin de contrôles « de routine », mais nécessité de « garde fous ».

Etant donné que la problématique principale de la contractualisation est celle du contrôle des bétons, il s'agit de définir avec précision les modalités de contrôle (suivant l'approche absolue, l'approche comparative ou une approche mixte) aux différents stades d'un projet : essai initial (étude), convenance, contrôle de production, contrôle de maintenance.

Il faut donc rechercher les indicateurs les plus performants et une corrélation entre des essais à court terme (28 jours) et ceux de références à plus long terme (90 jours) afin de rester dans des délais raisonnables et de pouvoir améliorer l'économie des projets.

Les modalités de contrôle et de gestion des non-conformités sont à préciser, avec les tolérances associées.

Le projet s'attachera à élaborer pour les livrables suivants :

- modèles de procédures qualité (Plan d'études des bétons, plans de contrôles intérieur et extérieur des bétons) ;
- cahiers des charges type en fonction des types d'ouvrages ;
 - ouvrages d'art ou bâtiments exceptionnels,

- bâtiments courants,
- guides ;
 - à l'attention des maîtres d'ouvrages,
 - à l'attention des maîtres d'œuvres et des laboratoires de contrôle,
 - à l'attention des entreprises / producteurs,
- proposition de compléments à apporter aux documents normatifs, par exemple à la NF EN 206-1/CN et à l'Eurocode 2 (modulation des enrobages).

L'observation d'opérations de construction-pilote est envisagée pour suivre l'applicabilité des méthodologies proposées.

5.6 Valorisation des résultats (Thème 5)

Les livrables principaux attendus des différents thèmes sont les suivants :

- définition des valeurs de répétabilité et reproductibilité des essais de durabilité normalisés ou en cours de normalisation ;
- mise au point d'essais de durabilité complémentaires permettant de traiter de l'ensemble des classes d'exposition de la norme NF EN 206-1 ;
- définition d'une méthodologie et proposition de seuils admissibles pour les indicateurs de durabilité et essais performantiels en fonction des classes d'exposition, de la durée d'utilisation de projet, des types de ciment et additions utilisés, et des enrobages d'armature retenus (approche performantielle absolue) ;
- établissement de règles permettant d'optimiser le choix du béton de référence (approche performantielle comparative) en fonction des classes d'exposition, de la durée d'utilisation de projet, des types de ciment et additions utilisés, et des enrobages d'armature retenus ;
- éléments d'aide à la rédaction de documents contractuels pour application de l'approche performantielle ;
- définition de règles permettant de s'assurer de la conformité du béton, point déterminant pour l'insertion de l'approche performantielle dans les normes ;
- établissement d'une méthodologie de requalification des ouvrages anciens à partir des mesures de témoins de durée de vie et d'indicateurs de durabilité sur échantillons carottés.

Les jalons principaux sont les suivants (voir planning prévisionnel global au chapitre 9) :

- définition des bétons à étudier ;
- fabrication des bétons en laboratoire ;
- caractérisation des bétons en laboratoire ;
- réalisation des essais inter-laboratoires ;
- sélection des ouvrages anciens à ausculter ;
- sélection des chantiers expérimentaux ;
- fabrication des corps d'épreuve ;
- sélection des modèles de vieillissement.

Il est prévu de coordonner les actions de recherche du Projet avec les actions en cours à l'International (au niveau du TC104, de la RILEM et de la *fib*) et de faire en sorte de pouvoir valoriser les conclusions issues du Projet, en particulier au niveau européen. Pour ce faire, un comité de suivi international sera organisé. Le Projet peut ainsi jouer un rôle moteur vis-à-vis de la normalisation européenne qui est peu avancée et peu dynamique sur ces sujets. Ce projet pourra par exemple servir de base à une éventuelle reprise des travaux du CEN TC 104/SC1/TG 17 pour une refonte du CEN/TR 16563 (Principes de l'approche d'équivalence de performance associée à la durabilité) pouvant à terme déboucher sur des évolutions de l'EN 206.

La valorisation du PN comprendra les actions suivantes :

- publications d'articles et de documents techniques (recommandations, CCTP type, modes opératoires, etc.) ;
- participation et organisation de colloques et de journées techniques ;
- contribution au déploiement de nouveaux essais dans les différents laboratoires nationaux
- contribution à l'évolution de la normalisation française en matière de durabilité du béton (et apport vers la normalisation européenne voire internationale) ;
- capitalisation des données issues du PN (via, entre autres, la base de données de l'AFGC) ;
- organisation du suivi du vieillissement à long terme des différents corps d'épreuve (dont ceux de BHP 2000) ;
- site Internet.

6 Partenaires potentiels

La plupart des acteurs de la construction sont motivés pour participer à cette recherche collective qui doit permettre une avancée significative dans l'établissement de conclusions consensuelles.

Nous dressons ci-dessous une liste des partenaires ayant formalisé leur volonté de participer au Projet National par l'envoi d'une lettre d'engagement :

- FNTP, VINCI Construction France, VINCI Construction Grands Projets, EIFFAGE Construction, CERIB, CEBTP, IFSTTAR, LRMH, ANDRA, CEA, LERM, LMDC, GeM, LaSIE, LAFARGE Ciments, ITALCIMENTI, VICAT, SIGMA béton, SNBPE, CEMEX Bétons, HOLCIM Bétons, UNPG, CHRYSO, ECOCEM, SURCHISTE, SIKA.

En complément, certains partenaires potentiels ont été sollicités et leur réponse est en attente :

- ATILH, CEREMA, FFB, BOUYGUES, SNCF, IRSN, IDRRIM, RATP, EDF, SYSTRA, IMGCC, ESTP, Bureaux d'ingénierie, Bureaux de contrôle, Assureurs, SYNAD, Fournisseurs d'additions, Laboratoires privés de la Construction, Grandes Écoles et Universités...

7 Budget global prévisionnel

Le budget prévisionnel global est donné dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 – Budget global prévisionnel

Description des thèmes de recherche	Budget global (k€ H.T.)
Thème 1 : Essais de durabilité	
Fabrication des échantillons	150
Caractérisation des bétons (carbonatation, chlorures)	375
Caractérisation des bétons (attaques chimiques)	210
Essais croisés (carbonatation, chlorures)	310
Essais croisés (attaques chimiques)	75
Essais croisés (gel+sels)	75
TOTAL (1)	1195
Thème 2 : Seuils admissibles / modélisation	
Auscultation d'ouvrages anciens	500
Auscultation des corps d'épreuve de BHP 2000 (y c corrosion)	150
Fabrication des corps d'épreuve	230
Auscultation des corps d'épreuve du PN	230
Suivi de corrosion sur corps d'épreuve	100
Benchmark / Sélection de modèles pour la définition des seuils	150
Proposition de seuils par classe d'exposition	60
TOTAL (2)	1420
Thème 3 : Bétons à étudier - Bétons de référence - Etude de variabilité	
Définition des bétons à étudier dans le PN	20
Cartographie des bétons conformes aux classes d'exposition de la norme	30
Etude de variabilité temporelle	350
Etude de variabilité spatiale	200
Etude de l'influence de la cure	100
TOTAL (3)	700
Thème 4 : Contractualisation de l'approche	
Identification des besoins pour la contractualisation	25
Modèles de procédures qualité	25
Rédaction d'un CCTP type	50
Rédaction de guides	25
TOTAL (4)	125
Thème 5 : Valorisation des résultats	
Rédaction de recommandations globales	100
Conférences/Communication	80
Comité de suivi international	20
Site Internet	10
TOTAL (5)	210
TOTAL (1+2+3+4+5)	3650
Frais de gestion administrative et financière 5%	183
TOTAL	3833

Dans un contexte où la part de financement des projets nationaux par la DRI du MEDDE est en forte baisse et non déterminée au moment de la rédaction de l'étude de montage, le plan de financement suivant a été imaginé :

- Etat (ministères / agences) ~ 10 à 20%
- Cotisations ~ 20 à 25%
- Apports exceptionnels ~ 5 à 10%
- Apports en nature ~ 60 à 65%

Un engagement de principe a été demandé dès avril 2014 aux partenaires potentiels afin de consolider la partie relative aux cotisations.

Il est également envisagé un co-financement du projet par l'Agence Nationale de la Recherche sur la partie modélisation (thème 2), qui apparaît sur la ligne Etat.

8 Planning prévisionnel

Le planning prévisionnel est le suivant :

Tableau 2 – Planning prévisionnel

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4
Thème 1 : Essais de durabilité				
Fabrication des échantillons	■	■		
Caractérisation des bétons (carbonatation, chlorures)	■	■	■	
Caractérisation des bétons (attaques chimiques)		■	■	
Caractérisation des bétons (gel + sels)		■	■	
Essais croisés (carbonatation, chlorures)		■	■	
Essais croisés (attaques chimiques)			■	
Essais croisés (gel+sels)			■	
Thème 2 : Seuils admissibles / modélisation				
Auscultation d'ouvrages anciens	■	■	■	■
Auscultation des corps d'épreuve de BHP 2000 (y c corrosion)	■	■	■	
Fabrication des corps d'épreuve	■			
Auscultation des corps d'épreuve du PN		■	■	
Suivi de corrosion sur corps d'épreuve				■
Benchmark/ Sélection de modèles pour la définition des seuils	■	■	■	
Proposition de seuils par classe d'exposition			■	
Thème 3 : Bétons à étudier - Bétons de référence - Etude de variabilité				
Définition des bétons à étudier dans le PN	■			
Cartographie des bétons conformes aux classes d'exposition de la norme			■	
Etude de variabilité temporelle		■		
Etude de variabilité spatiale		■	■	
Etude de l'influence de la cure			■	
Thème 4 : Contractualisation de l'approche				
Identification des besoins nécessaires à la contractualisation	■	■	■	
Rédaction de recommandations globales			■	■
Rédaction d'un CCTP type				■
Thème 5 : Valorisation des résultats				
Conférences/Communication				■

9 Annexes

9.1 Annexe 1 : Synthèse des approches performantielles à l'International

9.1.1 Les différentes approches de type performantiel en Europe

Ce chapitre permet de faire le point sur les avancées techniques et normatives en matière d'approche performantielle en Europe. Il reprend les principaux éléments du rapport « *Panorama à l'international des approches performantielles de la durabilité des bétons – Rapport CERIB 2014 – J. Mai-Nhu* »

9.1.1.1 Allemagne

En Allemagne, la mise en œuvre de l'approche performantielle relève du mandat des agréments techniques nationaux (abZ) délivré par le *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt). L'approche performantielle peut s'appliquer dans les cas suivants :

- utilisation d'un ciment non autorisé par la norme par manque d'expérience pratique ;
- autorisation de nouvelles additions, telles que le laitier granulé de haut-fourneau moulu ;
- béton dont la composition est dérivée de la norme DIN 1045-2 (annexe nationale allemande de l'EN 206-1).

L'évaluation des résultats d'essai relève du mandat des comités d'expertise du DIBt (SVA).

L'évaluation (en particulier les résultats des essais de durabilité) comprend :

- l'évaluation par rapport à des valeurs limites ;
- l'évaluation par rapport à la base de données du DIBt ;
- la comparaison au béton de référence.

9.1.1.1.1 La carbonatation

La profondeur de carbonatation du béton à qualifier est mesurée conformément au mode opératoire RILEM CPC 18 sur des prismes (40 mm x 40 mm x 160 mm) avec des granulats conformes à la norme EN 12620. La profondeur de carbonatation est déterminée après une durée d'essai de 180 jours. La carbonatation est à nouveau mesurée pour la même gâchée de béton après 5 ans pour obtenir des données sur le développement de la carbonatation avec le temps.

La profondeur de carbonatation et la vitesse de carbonatation du béton à qualifier sont comparées à une base de données. Cette base de données constitue le socle pour l'évaluation et la délivrance d'un agrément technique national ou d'un

agrément technique européen. La profondeur de carbonatation et la vitesse de carbonatation du béton à qualifier doivent être inférieures à une courbe limite.

9.1.1.1.2 La résistance à la pénétration des chlorures

La résistance à la pénétration des chlorures du béton à qualifier et du béton de référence avec du ciment Portland CEM I conforme à la norme EN 197-1 est déterminée conformément à la norme NT BUILD 492. L'essai de résistance à la pénétration des chlorures est effectué sur deux bétons.

Le coefficient de migration des chlorures du béton (D_{mig}) à qualifier » est comparé au coefficient de migration des chlorures du béton de référence aux âges de 35 et 97 jours. Le coefficient de migration des chlorures du béton (D_{mig}) à un âge de 97 jours est déclaré conformément à la catégorie pertinente spécifiée ci-dessous selon l'application ou l'utilisation finale particulière.

$D_{mig,5}$:	$D_{mig} \leq 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
$D_{mig,10}$:	$D_{mig} \leq 10.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
$D_{mig,25}$:	$D_{mig} \leq 25.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
D_{decl}	:	$D_{mig} \geq 25.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Les classes mentionnées ci-dessus ont été fixées par le comité d'experts du DIBt (SVA) pour l'évaluation du (des) constituant(s) (un nouveau ciment ou une nouvelle addition) pour un agrément technique national ou un agrément technique européen. En Allemagne, la classe $D_{mig,25}$ est le minimum à atteindre.

9.1.1.2 Italie

Le recours à une approche de la durabilité basée sur les performances des bétons est inclus dans le système normatif italien pour l'utilisation d'additions dans le béton. En particulier, les cendres volantes conformes à l'EN 450-1, la fumée de silice conforme à l'EN 13263-1 et le laitier granulé de haut-fourneau moulu conforme à l'EN 15167-1 sont autorisés sur la base de résultats d'essais de performance. Pour évaluer la perméabilité de ces bétons, les principaux essais utilisés correspondent à la résistance à la pénétration d'eau sous pression, conformément à la norme EN 12390-8 et la résistivité électrique. Pour satisfaire aux exigences de durabilité, il est recommandé que le béton ait un coefficient de perméabilité à l'eau (K) inférieur ou égal à 1.10^{-11} m/s ou une résistance à la pénétration de l'eau d'une valeur maximale de 50 mm et d'une valeur moyenne ne dépassant pas 20 mm conformément à l'EN 12390-8. Pour la résistivité, la valeur recommandée est supérieure ou égale à 100 000 Ohm.cm et il est fortement recommandé qu'elle ne soit pas inférieure à 10 000 Ohm.cm.

9.1.1.3 Pays-Bas

Aux Pays-Bas, la norme NEN-EN 1992-1-1 (Eurocode 2) est la norme de conception pour les constructions en béton en vigueur dans le contexte normatif néerlandais (« Bouwbesluit »). Le concept de performance équivalente du béton est introduit dans la norme NEN-EN 206-1:2012, au paragraphe 5.2.5.3. Ce concept permet de déroger aux exigences liées à un dosage minimal en ciment et un rapport $\frac{E_{eff}}{C}$ maximal lorsqu'une combinaison d'une addition spécifique et d'un ciment spécifique est utilisée. L'essai de performance doit permettre de démontrer

que le béton à qualifier a une performance au moins équivalente à celle d'un béton de référence formulé selon les spécifications requises pour la classe d'exposition considérée.

La norme NEN-EN 206-1 doit être utilisée en combinaison avec la norme NEN 8005 qui définit le dosage minimal en ciment et le rapport $\frac{E_{eff}}{C}$ maximal en fonction des classes d'exposition.

Aux Pays-Bas, le mode opératoire, les critères et les méthodes d'essai pour l'évaluation des performances du béton sont donnés dans les recommandations CUR 48 des directives nationales. Elles s'appliquent à l'évaluation de l'aptitude à l'emploi d'une combinaison addition(s)/ciment pour son application dans un béton. Pour démontrer les performances équivalentes du béton candidat, une ou plusieurs propriétés de durabilité doivent être testées selon la classe d'exposition considérée (carbonatation, pénétration des chlorures, résistance au gel-dégel avec sels de déverglaçage, résistance à l'eau de mer et agression par les sulfates). La résistance mécanique du béton candidat après 7 jours et 28 jours fait également partie de l'évaluation.

9.1.1.4 Norvège

Des exigences prescriptives en termes de « valeurs limites » pour 8 types de ciment, utilisés seuls ou en combinaison avec de la fumée de silice, des cendres volantes ou du laitier de haut-fourneau moulu sont données dans l'annexe nationale norvégienne à la norme EN 206-1, remplaçant le tableau F.1 de l'annexe F.

Quatre groupes peuvent être distingués :

1. CEM I, CEM II/A-D et CEM II/ A-V, des dispositions sont données pour une utilisation dans toutes les classes d'exposition ;
2. CEM II/A-S, des dispositions sont données pour toutes les classes d'exposition, sauf XF2, XF3 et XF4 ;
3. CEM II/B-S, CEM II/B-V et CEM III/A, des dispositions sont données pour toutes les classes d'exposition, sauf XC et XF ;
4. CEM II/A-L, des dispositions sont données pour toutes les classes d'exposition, sauf XD, XS, XF et XA.

L'annexe nationale, paragraphe NA.5.3.2 permet à l'utilisateur de démontrer des performances minimales pour les bétons constitués de ciments des groupes (2), (3) et (4) en matière de résistance au gel-dégel. L'exigence est donnée sous forme d'écaillage maximal obtenu après l'essai de la TS 12390-9 avec une solution saline après 56 ou 112 cycles. Pour les ciments contenant plus de 35 % de laitier de haut-fourneau moulu, l'échantillon d'essai doit être carbonaté sur au moins 2 mm avant l'essai.

L'annexe nationale, paragraphe NA.5.3.2 permet à l'utilisateur de démontrer, pour le groupe (3), des performances supérieures ou égales à l'un des ciments du groupe (1), en ce qui concerne la résistance à la carbonatation par un essai de performance réalisé conformément à l'EN 13295, mais avec une période d'exposition prolongée à 16 semaines, ou conformément à la norme CEN/TS 12390-10 (2 ans).

Pour le groupe (4), le paragraphe NA.5.3.2 permet à l'utilisateur de démontrer des performances supérieures ou égales à celles d'un ciment du groupe (1) en ce qui

concerne la résistance aux chlorures par un essai de performance (en prenant en compte soit une concentration augmentée à 6 % soit une période d'exposition augmentée à 2 ans).

Les ciments n'appartenant pas aux 8 types ci-dessus doivent être traités au cas par cas par l'organisme de certification.

9.1.1.5 Portugal

En conformité avec la norme EN 206-1 et son paragraphe 5.2.5.3, la norme E 464-2005 « Béton – Méthodologie prescriptive pour une durée de vie requise de 50 et 100 ans pour les classes d'exposition environnementales XC, XD et XS », parue au Portugal en mars 2005, présente à la fois l'approche prescriptive et une méthode de démonstration de l'équivalence de performance. Les méthodes proposées concernent uniquement le risque de corrosion due à la carbonatation et aux chlorures (classes d'exposition XC, XD et XS). Le concept permet l'utilisation d'exigences en matière de valeurs limites (dosage minimal de ciment et rapport E_{eff}/C maximal) différentes de celle établies dans les spécifications de la norme EN 206-1.

La norme E 464-2005 reprend le principe d'équivalence de performance en comparant les propriétés de durabilité d'un béton d'étude avec celles d'un béton de référence. Celui-ci doit être conforme aux exigences de l'approche prescriptive définie dans la norme EN 206-1. La méthode portugaise ne prend pas en compte les effets du vieillissement (*ageing effect*), mais reste conservative, jusqu'à l'identification des ciments de référence avec de meilleures performances, reconnus pour résister aux différents environnements :

- classes XC : CEM I ;
- classes XS/XD : CEM IV/A.

Le choix des autres constituants relève de la responsabilité du producteur de béton. Ils doivent être utilisés dans les bétons de référence et candidat.

Les formulations des bétons de référence et candidat relèvent de la responsabilité du producteur de béton. La résistance à la compression cible est $f_{ck} + 8$ MPa. La comparaison se fait à mélange granulaire identique pour les bétons d'étude et de référence.

9.1.1.6 Royaume-Uni

Au Royaume-Uni, il existe une procédure normalisée établie dans la norme BS 8500-1 pour la combinaison de ciment CEM I avec :

- des cendres volantes conformes à la norme EN 450-1:2005 catégorie A ou B ;
- du laitier granulé de haut-fourneau moulu conforme à la norme EN 15167-1 ;
- ou des fines calcaires conformes à la norme BS 7979.

Cette approche n'est applicable que pour les combinaisons présentant les mêmes proportions nominales que les ciments CEM II/A-L ou LL, CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-V, CEM II/B-V CEM III/A, CEM III/B et CEM IV/B(V) lorsqu'elles sont soumises à l'essai et qu'il est certifié qu'elles respectent la classe de résistance à la compression 22,5, 32,5, 42,5 ou 52,5 comme cela est établi dans les normes

EN 14216 ou EN 197-1. Pour satisfaire à la classe de résistance certifiée, la proportion de cendres volantes, de laitier granulé de haut-fourneau moulu ou de calcaire peut être inférieure aux proportions maximales autorisées par les normes EN 14216 ou EN 197-1. Dans ces conditions strictes, la combinaison est considérée équivalente au ciment conforme à la norme EN 197-1 de mêmes proportions nominales (en constituants), et la durabilité des bétons est supposée équivalente. Cette méthode évite la réalisation d'un essai de durabilité.

9.1.1.7 Espagne

En Espagne, le « Code du béton structurel » EHE-08 constitue le référentiel réglementaire pour la production de béton et le calcul des structures. Il a le même domaine d'application que celui des normes EN 206-1, EN 13670:2010 et EN 1992-1-1 combinées.

L'EHE-08 contient les exigences et spécifications traditionnelles pour prendre en compte la durabilité du béton dans les chapitres généraux et dispose d'une annexe (9), à travers laquelle il est possible de définir la composition/le type d'un béton en fonction de ses performances. L'EHE-08 fournit ensuite explicitement une procédure pour appliquer le concept de performance équivalente vis-à-vis des problématiques liées à la durabilité des armatures (carbonatation et pénétration des chlorures).

Deux méthodes différentes pour estimer les durées de vie sont fournies :

- par des règles de présomption de satisfaction (conformément aux exigences de l'EHE-08) ;
- par les performances (conformément au mode opératoire de l'EHE-08, annexe 9).

Dans les deux cas, la responsabilité du concepteur est définie dans l'EHE-08.

Si une modification de l'épaisseur d'enrobage est souhaitée, l'EHE-08 permet d'autres combinaisons de constituants pour la fabrication du béton, sous réserve de l'acceptation de ces modifications par le responsable du projet. L'annexe 9 fait référence à des modèles de durabilité pour certaines agressions telles que la carbonatation et la pénétration des ions chlorure. Aucune exigence n'est formulée dans l'annexe 9 concernant le type d'essais à utiliser pour se conformer aux paramètres des modèles.

Le vieillissement du béton est implicitement pris en compte dans l'EHE-08 en autorisant des épaisseurs d'enrobage de béton inférieures pour certains types de ciments et certaines additions. Dans le cas spécifique du modèle de durabilité qui traite des ions chlorure, l'annexe 9 de l'EHE-08 autorise l'utilisation d'un facteur de vieillissement du coefficient de diffusion des chlorures en fonction du type de ciment.

L'AENOR (Association Espagnole de Normalisation et de Certification) propose également, pour la conception de la durabilité relative à la corrosion des armatures, une méthode basée sur la mesure de la résistivité électrique d'échantillons de béton durcis ayant subi une cure identique à celle que l'on appliquerait pour des corps d'épreuve destinés à des mesures de résistance mécanique à la compression. La méthode, d'application volontaire, comprend :

- la mesure de la résistivité après 3, 7, 14 et 28 jours afin d'obtenir le facteur de vieillissement q et la résistivité nominale après 28 jours ;

- l'obtention d'un facteur de résistance à la carbonatation ou à la pénétration des ions chlorure r_{Cl,CO_2} , par la mesure de la porosité et :
 - d'un essai de diffusion naturelle des chlorures durant 90 jours, après 28 jours de cure ;
 - ou d'un essai de carbonatation en conditions naturelles pendant une période de 3 à 12 mois sur un échantillon (abrité ou non de la pluie), après 28 jours de cure.

L'équivalence de performance est déclarée si la résistivité apparente ρ_{ap} , calculée après 28 jours (ou à tout autre échéance convenue) est statistiquement la même.

$$\rho_{ap}(t) = r_{Cl,CO_2} \cdot \rho_{ef} \cdot \left(\frac{t_0}{t_n} \right)^q$$

ρ_{ef} est la résistivité mesurée pour un échantillon de béton durci dans des conditions humides pendant 28 jours (c'est-à-dire les mêmes conditions que pour la résistance mécanique).

9.1.2 Les différentes approches de type performantiel à l'internationale (hors europe)

Les approches performantielles à l'internationale sont relativement peu nombreuses. La plupart des pays ayant recours à une telle approche de la durabilité se contente d'ajouter des critères performantiels aux spécifications prescriptives déjà citées dans les normes en vigueur.

Les principales approches prescriptives et performantielles sont présentées dans les paragraphes suivants.

9.1.2.1 États-Unis [4]

Les travaux du groupe de travail ACI Innovation Task Group 8 ont conduit à la réalisation d'un rapport ITG-8R-10 « Report on Performance-Based Requirements for Concrete » dont les objectifs sont de :

- introduire des exigences de performances et les comparer aux exigences prescriptives actuelles ;
- discuter des caractéristiques essentielles des critères de performance ;
- discuter des conditions d'utilisation des critères de performances comme alternative aux spécifications prescriptives.

Aux États-Unis, les comités ACI (American Concrete Institute) ont mis au point les principaux documents normalisés qui sont les « ACI Codes », tels que la norme ACI 318, et les « ACI reference specifications ». La norme ACI 318-08 « Building Code Requirements for Structural Concrete » de 2008, et la norme ACI 301-10 « Specifications for Structural Concrete » de 2008 mentionnent toutes les deux des exigences à la fois prescriptives et performantielles pour le matériau béton. Le chapitre 4 de la norme ACI 318-08 contient des exigences vis-à-vis de la durabilité du matériau pour différentes conditions d'exposition, notamment concernant le rapport $\frac{E_{eff}}{L}$, la résistance minimale à la compression, la quantité d'air occlus, la

quantité initiale maximale d'ions chlorure et des exigences sur la nature du ciment utilisé. Ces exigences sont pour la plupart de nature prescriptive mais aucune exigence n'est spécifiée concernant la quantité de ciment, la quantité d'addition ou la quantité d'eau. Seule une limitation d'utilisation d'addition est mentionnée dans le cas des bétons exposés à des sels de déverglaçage.

En 2008, de nouvelles dispositions ont été ajoutées à la norme ACI 318-08 sur la base des exigences performantielles. Ces nouvelles dispositions permettent entre autres l'utilisation de combinaisons alternatives de matériaux cimentaires et d'additions pour améliorer la résistance aux sulfates en faisant référence à une méthode normalisée pour démontrer les performances et spécifier des limites d'acceptation.

Le chapitre 6 du rapport ITG-8R-10 détaille la nature des exigences prescriptives dans les normes ACI 318-08 et ACI 301-08 et discute des exigences de performance comme alternatives aux exigences prescriptives tels que le rapport $\frac{F_{eff}}{L}$ et la résistance mécanique à la compression, en fonction des classes d'exposition. Ce rapport préconise l'utilisation d'une valeur limite de conductivité électrique du béton comme exigence alternative lorsqu'on étudie la résistance à la pénétration de fluides. Un des objectifs des comités ACI est d'aboutir à un consensus sur les critères d'acceptation exacts pour ces exigences performantielles. À l'image des critères d'acceptation utilisés pour les résistances mécaniques, les critères pour les propriétés de durabilité devraient inclure les éléments-clés suivant :

- les propriétés et les valeurs seuils à utiliser ;
- les éléments utilisés pour obtenir des échantillons représentatifs du lot à évaluer ;
- une procédure normalisée de préparation et de pré-conditionnement des corps d'épreuve ;
- une méthode d'essai normalisée ;
- des critères précisant si les résultats des essais indiquent un niveau de performance acceptable, incluant des méthodes statistiques ;
- les actions à entreprendre si les résultats d'essais des corps d'épreuve ne satisfont pas les critères performantiels.

9.1.2.2 Chine [5]

Depuis les années 1980, la Chine a développé l'un des plus grands programmes de construction d'infrastructure en béton dans le monde. En 2010, la consommation de ciment en Chine s'élevait à 1,9 milliard de tonnes, avoisinant les 56 % de la production mondiale (3,3 milliards de tonnes).

Dans ce contexte, le développement de nouvelles approches de dimensionnement des structures en béton armé basées sur les performances des couples « béton/enrobage » revêt un réel intérêt tant sur le plan environnemental que sur le plan technico-économique. Le guide national CCES01-04, développé par la société d'ingénierie civile chinoise (Chinese Civil Engineering Society, CCES), pose les bases techniques et normatives pour le dimensionnement de structures en béton. En Chine, on distingue deux principales approches : une approche prescriptive et une approche basée sur la modélisation. L'approche basée sur la modélisation de la durabilité est utilisée pour évaluer l'état de dégradation et vérifier les performances

résiduelles de la structure en béton via la détermination des facteurs partiels de sécurité ou d'indice de fiabilité.

9.1.2.3 Japon [6]

Au Japon, il existe un référentiel mis au point par la Japan Society of Civil Engineers (JSCE), leader de l'organisation des investigations, de la recherche, de la promotion technologique et de l'enseignement du béton au Japon : le JSCE Guidelines for Concrete n° 15 « Standard specifications for concrete structures (SSCS) – Design » (2007).

Dans ce document de plus de 500 pages, toutes les spécifications concernant la vérification de performances structurelles, la vérification des performances vis-à-vis des séismes, les matériaux, la construction, la maintenance, les barrages et le béton de voirie ont été transposées d'une approche prescriptive vers une approche de type performantiel. L'approche performantielle ainsi définie apparaissait déjà dès le début des années 2000. La révision du SSCS - Design en 2007 permet d'aboutir à un document qui détaille non seulement toutes les étapes du concept de l'approche performantielle mais qui fournit également toutes les conditions pour la rendre réellement applicable.

9.1.2.4 Afrique du Sud [7]

En Afrique du Sud, la Durability Index Approach (Approche basée sur des indicateurs de durabilité notés ID) est une approche développée sous le pilotage de C&CI Technical Committee.

Deux indicateurs de durabilité sont retenus : un indicateur lié à la perméabilité à l'oxygène (OPI = $-\log_{10}(K)$, K représentant la perméabilité à l'oxygène) utilisé pour évaluer la résistance du béton au phénomène de carbonatation et un indicateur lié à la migration des ions chlorure sous champs électrique (CCI). Ces essais sont réalisés en laboratoire sur des bétons d'ouvrage et sur des éprouvettes de contrôle. Une méthode de formulation basée sur des exigences performantielles imposera donc une valeur minimum d'OPI pour les bétons soumis à la carbonatation, et une valeur maximale de CCI pour les bétons soumis à des environnements contenant des ions chlorure. Ces valeurs seuils dépendent du niveau d'agressivité de l'environnement, de l'humidité relative environnante, de la nature du liant et de l'épaisseur d'enrobage choisi. L'approche performantielle ID impose également une gamme de résistance à la compression et un rapport $\frac{E_{eff}}{C + A}$ maximal pour certaines classes d'exposition.

9.2 Annexe 2 : Etat de l'art International – travaux de recherche en cours

9.2.1 Introduction

L'étude présentée ici vise à compléter le bilan des travaux de recherche menés à l'étranger sur la thématique du projet, à savoir l'approche performantielle de la durabilité des bétons. Nous ferons principalement référence aux articles publiés dans les revues internationales à comité de lecture, même si de nombreux travaux de recherche sont par ailleurs diffusés dans les thèses de doctorat, les actes de congrès, workshop spécialisés, rapports RILEM, etc. Une recherche par mot clé confirme tout d'abord la quantité croissante et considérable de travaux sur la durabilité des bétons (Figure 1) : Web of Science recense 3317 références sur les 20 dernières années. Les articles portant sur l'approche performantielle (Figure 2) sont en nombre beaucoup plus réduit (146 références) mais l'évolution est parallèle : un changement d'ordre de grandeur en 2005 et une accélération depuis 2012.

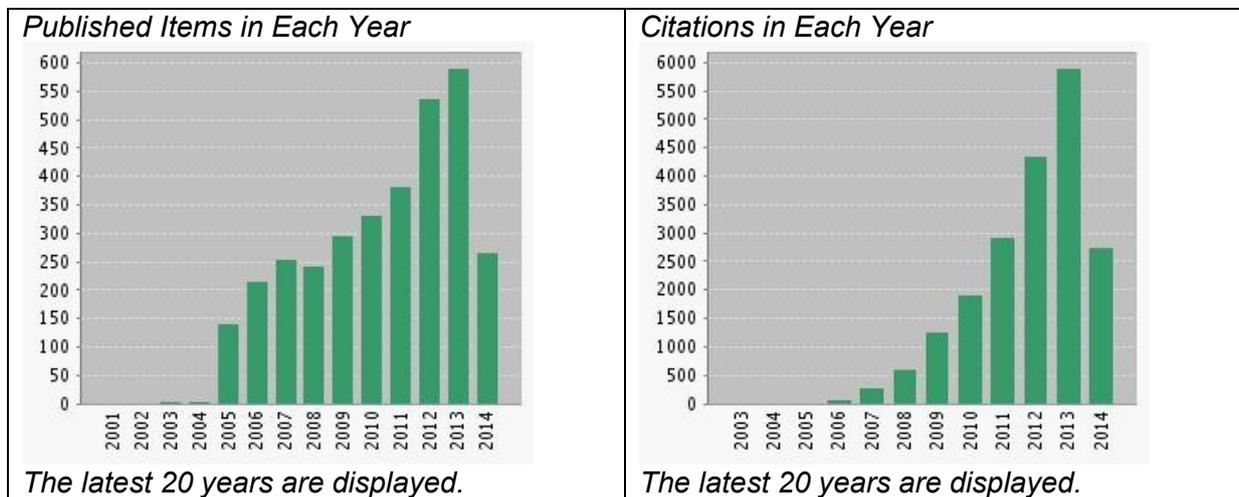


Figure 1. Recensement des articles publiés sur la durabilité des bétons (TOPIC: durability concrete), d'après Web of Science.

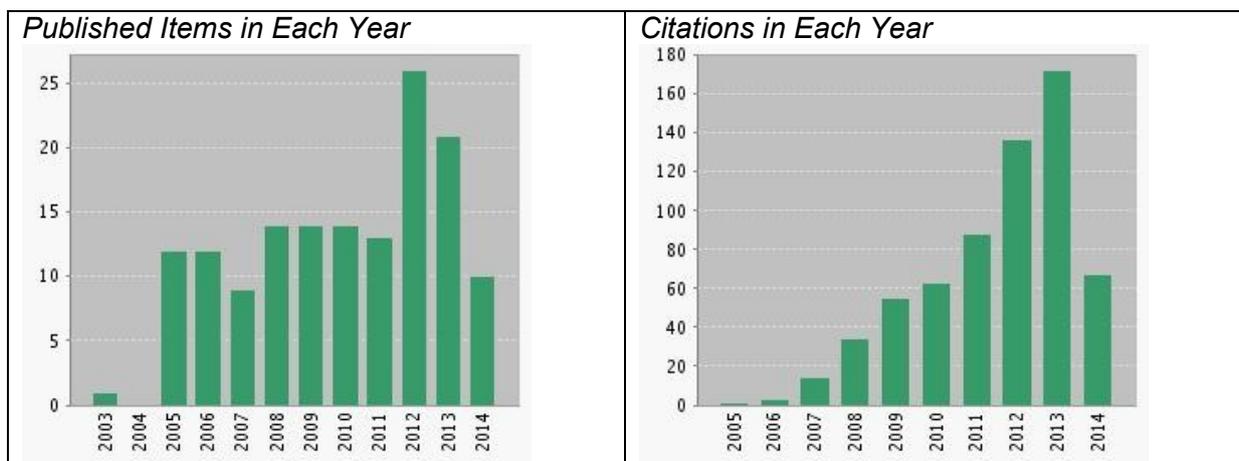


Figure 2. Recensement des articles publiés sur l'approche performantielle (TOPIC: Performance based specifications concrete), d'après Web of Science.

En ce qui concerne l'approche performantielle, nous avons complété cette recherche dans Web of Science par une recherche sur les principaux portails donnant accès aux articles de revues. *ScienceDirect* fournit 51 références (pour "performance based specifications" and "concrete" dans le titre, le résumé ou les mots clés), *Springer* donne 30 références, et *l'International Concrete Abstracts Portal* (ACI) 7 Références. Les résultats de la recherche automatique comprennent des études sur l'analyse structurelle ou les matériaux bitumineux. Cette recherche a été complétée par d'autres références qui nous semblaient pertinentes. Dans la liste présentée à la fin du document, nous avons ainsi retenu 94 articles et documents.

9.2.2 Les limites de l'approche prescriptive : les bétons modernes et les matériaux alternatifs

Plusieurs travaux de recherche démontrent que les valeurs limites de composition (en particulier le rapport eau/ciment) et la résistance en compression, indicateurs traditionnels de la performance des bétons, ne sont désormais plus suffisantes pour évaluer la durabilité potentielle des bétons [2008.2, 2003.1, 1988.1]. Même dans le cas où les compositions respectent les valeurs limites, l'approche performantielle est nécessaire pour orienter ou optimiser les choix des compositions en fonction de la durabilité visée. En particulier, il est rapidement apparu que l'approche prescriptive ne valorisait pas complètement la durabilité potentielle des bétons à hautes performances (BHP) [2002.1] et des bétons auto-plaçants (BAP). Leur composition diffère de manière significative des bétons vibrés : volume de pâte élevé, utilisation d'adjuvants, rapport eau/liant plus faible. Les propriétés des bétons auto-plaçants ont fait l'objet de nombreuses études [2014.3, 2012.1, 2012.2, 2012.3, 2012.12, 2009.2, 2008.7, 2006.3, 2003.1] en vue d'élaborer des spécifications performantielles.

En outre, des raisons techniques, économiques ou environnementales [2014.2] peuvent conduire à l'emploi de constituants dans des proportions supérieures aux valeurs limites de l'approche prescriptive, ou l'emploi de constituants non normalisés. L'approche performantielle devient alors nécessaire dans la mesure où ces bétons ne peuvent être qualifiés sur la base de leur composition mais il est nécessaire d'évaluer leur comportement – rhéologie, retrait [2012.10, 2008.2, 2005.1], durabilité – dans un environnement donné.

Un certain nombre de travaux de recherche tentent de quantifier l'impact de constituants alternatifs au ciment Portland et aux granulats naturels sur les performances des bétons. Ainsi la qualification des bétons de granulats recyclés [2012.4, 2012.7, 2010.5] ou de ressources locales [2006.1] a été envisagée de manière performantielle. Les performances des bétons permettent également d'évaluer l'activité des additions minérales (ou *supplementary cementing materials*) et leur contribution à la durabilité : cendres volantes [2000.3, 1985.1], laitier [2010.8, 2005.2], fumée de silice [2014.6, 1999.3], liants ternaires [2004.3, 1999.1], métakaolin [2014.1]. Enfin l'approche performantielle est la seule alternative pour qualifier des systèmes différents ou innovants : *Alkali Activated Materials* [2014.7], inhibiteurs de corrosion [2013.7].

Bilan : Il reste facile de trouver des contradictions au niveau des recherches sur la durabilité des bétons modernes et de l'influence des matériaux alternatifs. Cela est parfois dû à la variabilité de leurs propriétés, mais le plus souvent lié à la diversité des approches et des protocoles expérimentaux. En effet, en posant la question de la durabilité de ces bétons, ces travaux alimentent la réflexion sur les procédures expérimentales et les méthodes de conception performantielles. On peut noter qu'il n'existe pas de consensus à ce sujet, même en ce qui concerne les principaux mécanismes de dégradation tels que le risque de corrosion induit par la carbonatation et la pénétration des ions chlorures.

9.2.3 Les différentes méthodologies performantielles et leurs limites

La norme européenne EN 206-1 (2004) a favorisé le développement de méthodes de conception performantielles (y compris hors d'Europe) en regroupant les environnements dans des « classes d'exposition » et en définissant ainsi les sollicitations environnementales. Selon ce principe, il devient possible de qualifier un béton ou un ouvrage pour un mécanisme de dégradation donné. Plusieurs approches se sont développées [2012.6]. Afin de les analyser, nous adoptons la classification proposée par Andrade [2006.4], au cours du Workshop International RILEM *Performance based evaluation and indicators for concrete durability* (19-21 mars 2006) :

Niveau I	Obligation de moyens : - valeurs limites de composition et type de ciment, - résistance minimale, - enrobage minimal.
Niveau II	1. Indicateurs de durabilité: Porosité, perméabilité, coefficient de diffusion, résistivité. 2. Essais performantiels, en fonction du mécanisme de dégradation considéré.
Niveau III	Modèles : conception pour une durée de vie donnée.
Niveau IV	Approches probabilistes

9.2.3.1 Indicateurs de durabilité

Les indicateurs de durabilité les plus souvent cités sont la porosité, la perméabilité (à l'eau ou au gaz), le coefficient de diffusion des ions chlorures et la résistivité. Ils ne sont donc pas spécifiques d'un mécanisme de dégradation donné mais permettent de quantifier la résistance des bétons à la pénétration des agents agressifs. Certains de ces indicateurs peuvent également être utilisés comme données d'entrée de modèles (cf. niveau III), pour assurer le suivi de la régularité de la production ou le contrôle in situ de la qualité du béton d'enrobage.

Dans ces derniers cas, les indicateurs retenus doivent être sensibles aux paramètres de composition et de mise en œuvre (vibration, cure) afin de détecter d'éventuelles variations de la durabilité potentielle des bétons au cours de la production. La résistance en compression ne semble pas satisfaire ce critère [2008.2]. La perméabilité à l'air mesurée selon la procédure de Torrent [1992.1] pourrait répondre à cette problématique, en tenant compte de l'influence de la teneur en eau du béton [2005.7]. La résistivité a été proposée car elle se corrèle au coefficient de diffusion (cf. projet Chlortest).

Cependant, plusieurs questions sont posées par les travaux de recherches :
Quels sont les mécanismes physiques/chimiques mis en jeu au cours des essais, et sont-ils représentatifs du comportement des bétons dans les conditions réelles d'exposition [2014.4, 2013.5, 2010.6, 2008.4] ?

1. Existe-t-il des corrélations entre les indicateurs généraux (ou une combinaison de ces indicateurs) et les indicateurs spécifiques d'un mécanisme de dégradation [2011.5, 2004.4, 2001.3, 1999.3, 1988.1] ?
2. Comment intégrer les indicateurs généraux de durabilité dans les modèles de calcul de durée de vie [2013.1, 2009.4, 2008.6] ?
3. Comment formuler les bétons pour une performance donnée [2014.6, 2014.7, 2012.1, 2012.2, 2012.3, 2008.3, 2008.5] ?

9.2.3.2 Essais performantiels

Les essais performantiels permettent de classer les bétons selon leur résistance à un mécanisme de dégradation donné. Cela permet de prendre en compte les spécificités des mécanismes [2013.6, 2012.12, 2011.3, 2010.2, 2009.1, 2009.2, 2009.3, 2008.7]. Parmi les questions récurrentes posées par les travaux de recherche et de mise en pratique de l'approche performantielle, on peut citer :

1. Quelle est la représentativité de l'essai par rapport aux conditions réelles de dégradation [2011.5] ?
2. Comment accélérer l'essai sans remettre en cause sa représentativité [2001.2, 2000.2] ?
3. Peut-on relier la réponse à l'essai et la durée de vie de projet, autrement dit, passer d'une approche comparative à des valeurs seuils ?

9.2.3.3 Modèles de conception pour une durée de vie

Les travaux de recherche menés ces dernières années ont permis un enrichissement des modèles, grâce à la meilleure compréhension des mécanismes et au développement des méthodes numériques [2000.5]. Les améliorations proposées concernent :

- la pénétration des ions chlorures dans le béton partiellement saturé [2009.4],
- la prise en compte des couplages entre séchage et hydratation, qui permettent de calculer localement le taux de saturation et les propriétés de transport du béton [2004.5],
- la description des interactions physiques et chimiques entre les agents agressifs et la matrice cimentaire [2009.4, 2002.2], donc les éventuels couplages entre mécanismes associés,
- la prise en compte de l'endommagement mécanique du béton d'enrobage [2007.2],
- la prise en compte des protections [2013.7].

Cependant, des questions restent posées :

- la calibration des nouveaux modèles demande un retour d'expérience à partir d'ouvrages réels [2008.6, 2006.4, 2006.5] sur des durées significatives, or le suivi des ouvrages requiert des compétences différentes et des moyens conséquents,
- comment estimer l'évolution temporelle des propriétés des bétons [2012.2] en fonction de la composition des bétons et de l'environnement – en particulier le coefficient de diffusion des chlorures [2006.5, 2005.8],
- comment mettre en pratique les méthodes de conception performantielles fondées sur des modèles [2009.4, 2009.5, 2008.1] ?
- quelle est l'influence de la mise en œuvre sur les performances des bétons [2005.2] ?
- comment décrire et modéliser l'initiation de la corrosion et les phases de dégradation consécutives [1982.1] ?

9.2.3.4 Approches probabilistes

Une amélioration significative des modèles consiste en la prise en compte de la variabilité des paramètres liés au matériau, à l'exécution de l'ouvrage et à l'environnement [2000.4, 1999.2]. Cela répond au contexte probabiliste proposé par les codes de calcul des structures pour la définition des états limites et surtout des niveaux de fiabilité associés.

Pour les paramètres de premier ordre, on utilise donc comme paramètres d'entrée les valeurs moyennes des propriétés de durabilité, mais également leur coefficient de variation. Ils permettent de calculer l'évolution d'un indice de fiabilité (ou une probabilité de défaillance) dans le temps en intégrant par exemple la variabilité de l'enrobage des aciers et celle des caractéristiques du béton et de l'environnement. Certains paramètres intrinsèques au modèle peuvent également présenter un caractère incertain qu'il est possible de prendre en compte.

Dans le cadre de l'approche performantielle, les modèles probabilistes peuvent être utilisés [2010.1] pour requalifier/valider les seuils associés aux indicateurs de durabilité ou bien encore en proposer de nouveaux eu égard à certaines dispositions constructives particulières. Ces modèles permettent également de fournir des règles d'acceptation d'un béton à qualifier et de mettre en évidence les indicateurs les plus sensibles pour lesquels une limitation de la variabilité s'impose pour garantir une durée de vie suffisante.

Les travaux de recherche en cours mettent en évidence plusieurs problématiques :

- comment déterminer le coefficient de variation des propriétés de durabilité [2013.1, 2012.8] ?
- comment concilier la complexité du modèle et sa probabilisation [2013.4] ?

9.2.4 Focus sur quelques approches

Dans cette partie nous allons illustrer par deux exemples comment plusieurs auteurs ont proposé des réponses aux problématiques énoncées précédemment.

9.2.4.1 Afrique du Sud (Alexander et al.)

Les travaux de Mark G. Alexander [2013.1, 2012.6, 2010.7, 2008.6, 2005.2, 2004.4, 1999.3], Université de Cape Town, portent sur l'approche performantielle de la durabilité depuis le début des années 1990. Les principales étapes de ses travaux ont été le développement des essais performantiels, la caractérisation d'un nombre important de bétons à l'aide ces essais, l'évaluation des performances réelles des bétons in situ, et l'application de l'approche à des projets de construction [2013.1]. Ils s'appuient sur les classes d'exposition de la norme EN 206-1, adaptées au climat local.

La méthodologie développée s'appuie sur des indicateurs de durabilité (Durability Index parameters), des modèles de prédiction de la durée de vie, et des spécifications performantielles. Les indicateurs sont utilisés à la fois comme données d'entrée des modèles (partiellement empiriques), comme spécifications, et mesurés sur les ouvrages construits pour calibrer les modèles. La perméabilité à l'oxygène (oxygen permeability index) est utilisée pour le modèle de prédiction de la carbonatation, la conductivité (chloride conductivity, en mS/cm) pour le modèle de

pénétration des ions chlorures, et le taux d'absorption (*water sorptivity, en mm/√h*) pour estimer la qualité de la cure. La corrélation entre la perméabilité au gaz et la carbonatation ne fait pas consensus [2009.1, 2001.3] ; il est à noter ici que l'essai sud-africain est réalisé après un séchage à 50°C pendant 7 jours, ce qui est relativement doux et permet de prendre en compte la capacité de certains bétons à conserver un taux de saturation élevé et donc à ralentir la pénétration du CO₂.

L'approche distingue la durabilité potentielle du matériau (*material potential*), responsabilité du producteur de béton, et la qualité du béton mis en œuvre (*in-situ construction quality*), responsabilité du constructeur. Des essais sont donc réalisés à la fois sur le matériau livré (*as-supplied*) après 5 jours de cure humide et sur le résultat de la mise en œuvre (*as-built quality*) par des prélèvements. Alexander et al. insistent sur la nécessité de ces mesures sur le matériau as-built pour garantir la durabilité des ouvrages.

Selon ses auteurs, un point-clé de l'approche consiste en effet à vérifier par des retours d'expériences la corrélation entre les indicateurs de durabilité et la performance réelle des bétons mis en œuvre, afin de pouvoir améliorer les modèles.

9.2.4.2 Amérique du Nord (Hooton et al.)

La norme canadienne CSA A23.1, révisée en 2009 (*CSA A23.1-09. Concrete materials and methods of concrete construction. Can Stand Assoc, Mississauga, Ontario, Canada, L4W 5N6; 2009*), comprend depuis 2004 des exigences relatives aux bétons faisant l'objet de spécifications performantielles. La norme définit les responsabilités des parties prenantes (maître d'ouvrage, constructeur, producteur de béton) en cas de spécifications performantielles (*Table 5 Alternative methods for specifying concrete*). Selon Hooton et al. son annexe J constitue un très bon guide pour la mise en œuvre de l'approche performantielle. Comme la norme européenne, la norme canadienne s'appuie sur la définition de classes d'exposition. En plus des valeurs limites de composition, elle spécifie pour chaque classe une cure, et des valeurs limites selon les critères de la norme ASTM C1202 pour les classes C-XL, C-1 et A-1 (chlorures) et la norme ASTM C1012 pour les classes S (attaques sulfatiques).

R. Doug Hooton [2014.2, 2008.1], Université de Toronto, a proposé des données et des éléments de réflexion pour la conception de méthodologies performantielles. D'après ses travaux, la mise en œuvre de l'approche performantielle passe par une collaboration plus étroite entre les parties prenantes : maître d'ouvrage, constructeur, producteur de béton, équipes responsables de la mise en œuvre, etc. Il insiste sur les procédures à développer et déployer pour assurer le respect des spécifications performantielles, et l'influence de la mise en œuvre sur les performances réelles des bétons. Ainsi la température du béton, la mise vibration, la protection du béton frais et la cure doivent faire l'objet de précautions détaillées dans les spécifications performantielles. Des programmes d'essais et un suivi particulier doivent être mis en place pour s'assurer que les spécifications sont respectées.

En ce qui concerne les indicateurs de durabilité, il recommande de maximiser la résistance à la pénétration des agents agressifs pour les expositions les plus sévères. Les essais performantiels sont utilisés à différentes étapes du projet :

- pré-qualification des bétons,
- contrôle qualité, pour s'assurer que (a) les matériaux respectent les

spécifications, (b) le béton fourni est équivalent au béton pré-qualifié (*identity testing*), (c) les procédures de mise en œuvre du béton définies lors de la pré-qualification ont été respectées,

- Essais in-situ : utilisation de mesures non-destructives ou d'essais sur des échantillons prélevés sur la structure pour s'assurer que le béton fourni et les méthodes de mise en œuvre permettent d'atteindre les performances définies par le maître d'ouvrage (*End Result Specifications*, *ERS*).

R.D. Hooton participe au développement de spécifications performantielles pour des maîtres d'ouvrages. Il donne dans [2014.2] un exemple de cahier des charges performantiel, pour un radier et la classe d'exposition C-1 (*Structurally reinforced concrete exposed to chlorides with or without freezing and thawing conditions*, cf. norme canadienne). Dans ce cas l'objectif est donc d'obtenir un béton non fissuré, compact, résistant au gel/dégel, avec un retrait faible.

Les spécifications performantielles pour le béton mis en œuvre (*in-place*) sont les suivantes :

1. Résistance minimale à 91 jours: 30 MPa.
2. Teneur minimale en air : 3.0%
3. Facteur d'espacement maximal de 230 μm , avec aucune valeur individuelle supérieure à 260 μm .
4. Valeur maximale de x coulombs à 56 jours selon la norme ASTM C1202 : les essais menés avant la construction proposent une corrélation et une valeur maximale correspondant à un coefficient de diffusion de $3,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ à 28 jours selon la norme ASTM 1556.
5. Retrait de dessiccation à 28 jours, selon la procédure expérimentale CSA A23.2-21C, inférieur à 0,040% (début des mesures de retrait après 7 jours de cure humide, puis conservation à 50 % HR et 23°C)
6. Gradient maximal de température dans l'élément: 20°C. Le décoffrage ne doit pas avoir lieu tant que le gradient de température entre le béton de surface et la température ambiante ne respecte pas le tableau 21 de CSA A23.1.

Des essais sur un corps d'épreuve reproduisant les effets de taille et les conditions aux limites (Monolith tests) sont préconisés, après la pré-qualification en laboratoire.

Le cahier des charges précise que les essais sur le béton mis en œuvre sont préférés aux essais sur des échantillons prélevés lors du coulage. Les essais sont donc réalisés sur des échantillons carottés et testés aux échéances prévues. Le cahier des charges définit également les responsabilités du constructeur et du producteur de béton, ainsi que le contrôle qualité durant la construction.

9.2.5 Bilan

Au vu des travaux publiés, plusieurs résultats et problématiques se dégagent des travaux de recherche en cours au niveau international.

- L'approche performantielle est un levier puissant et nécessaire pour l'innovation et le développement durable [2014.2], dans l'objectif de durabilité des structures en béton. A la différence de l'approche prescriptive, elle permet d'exploiter le potentiel des bétons modernes, au-delà de leur résistance mécanique (BHP) et de leur ergonomie (BAP). Elle permet également d'envisager les additions minérales comme de nouveaux degrés de liberté pour répondre aux problématiques techniques, environnementales et économiques.

- La conception de méthodologies performantielles requiert une action concertée de tous les acteurs de la construction, et leur application nécessite une très bonne coordination des parties prenantes du projet [2014.2, 2013.1, 2008.2].
- La mise en pratique des approches performantielles requiert plusieurs étapes et procédures associées. La conception (*design*) passe par des modèles (retours d'expérience, modèles analytiques ou numériques, etc.) liant la composition ou des paramètres physico-chimiques du béton à la durée de vie, les spécifications portent sur des propriétés pertinentes du point de vue de la durabilité et de la classe d'exposition considérée, le contrôle est fondé sur des mesures corrélées aux propriétés précédentes mais moins coûteuses. La problématique du choix des paramètres ou propriétés en fonction des étapes n'est pas résolue : peut-on utiliser le même essai ou critère pour la conception, les spécifications et le contrôle ? Sinon, peut-on se fonder sur des corrélations fiables entre les grandeurs mesurées ou avec la durée de vie ?
- La probabilisation des modèles et des approches pose la question de l'estimation de la variabilité associée aux propriétés de durabilité potentielle [2013.1, 2005.3]. Dans la mesure où cette variabilité peut dépendre de la variabilité des constituants (par exemple : bétons recyclés), des études spécifiques sont nécessaires.
- Actuellement, peu de modèles prennent en compte l'influence de la fissuration, en particulier les effets du retrait et des variations de température [2008.2], et le fait que le béton d'enrobage a vraisemblablement un coefficient de diffusion plus élevé à cause de l'influence de la mise en œuvre et de la cure.
- Plusieurs auteurs des études référencées insistent la nécessité d'un retour d'expérience significatif (plusieurs années ou dizaines d'années) pour calibrer les modèles avec des paramètres pertinents (matériau, environnement) et leur donner ainsi un rôle prédictif.

9.2.6 Références

2014

1. R. San Nicolas, M. Cyr, G. Escadeillas, Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement, *Construction and Building Materials*, Volume 55, 31 March 2014, Pages 313-322
2. R. Doug Hooton, John A. Bickley, Design for durability: The key to improving concrete sustainability, *Construction and Building Materials*, In Press, Corrected Proof, Available online 21 January 2014
3. Long, Wu-Jian; Khayat, Kamal Henri; Lemieux, Guillaume; et al., Performance-Based Specifications of Workability Characteristics of Prestressed, Precast Self-Consolidating Concrete-A North American Prospective, *MATERIALS* Volume: 7 Issue: 4 Pages: 2474-2489, Published: APR 2014
4. Ryan, Eric; Burdette, Edwin; Ankabrandt, Ryan; et al., Comparison of Two Methods to Assess the Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration, *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING* Volume: 26 Issue: 4 Pages: 698-704 Published: APR 1 2014
5. Jeong, Jin-Hoon; Lim, Jin-Sun; Suh, Young-Chan; et al., Development of Performance Criteria for Korean Pavement Warranty Specification, *JOURNAL OF PERFORMANCE OF CONSTRUCTED FACILITIES* Volume: 28 Issue: 2 Pages: 402-411 Published: APR 1 2014

6. Baltazar, Luis G.; Henriques, Fernando M. A.; Jorne, Fernando; et al., Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts, CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS Volume: 50 Pages: 584-597 Published: JAN 15 2014

7. Lesley S.-C. Ko, Irene Beleña, Peter Duxson, Elena Kavalerova..., AAM Concretes: Standards for Mix Design/Formulation and Early-Age Properties, Chapter, in Alkali Activated Materials (2014)

2013

1. G. Nganga, Mark Alexander, Hans Beushausen Practical implementation of the durability index performance-based design approach, Construction and Building Materials, Volume 45, August 2013, Pages 251-261

2. Kute, Sunil Y.; Kale, Rajeev S., Five-Layer Fuzzy Inference System to Design a Concrete Mixture, Based on ACI Method, ACI MATERIALS JOURNAL Volume: 110 Issue: 6 Pages: 629-639 Published: NOV-DEC 2013

3. Hasan, Mohd Rosli Mohd; Goh, Shu Wei; You, Zhanping, Comparative study on the properties of WMA mixture using foamed admixture and free water system, CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS Volume: 48 Pages: 45-50 Published: NOV 2013

4. Madeleine Flint, Jack Baker, A Probabilistic Framework for Performance-Based Durability Engineering, Chapter in Durability of Building Materials and Compo... (2013)

5. O. Sengul, Factors Affecting the Electrical Resistivity of Concrete, Chapter in Nondestructive Testing of Materials and Structures (2013)

6. Anjan Chatterjee, Alaster Goyns, Cementitious Materials Performance in Aggressive Aqueous Environments – Engineering Perspectives, Chapter in Performance of Cement-Based Materials in A... (2013)

7. Pedro Faustino, Ana Brás, Thomaz Ripper, The effect of corrosion inhibitors on the modelling of design lifetime of RC structures, Materials and Structures (2013)

8. Ercan Erdis, Sitki Alper Ozdemir, Analysis of technical specification-based disputes in construction industry, in KSCE Journal of Civil Engineering (2013)

2012

1. M.J. Shannag, S.M. Mourad, Flowable high strength cementitious matrices for ferrocement applications, Construction and Building Materials, Volume 36, November 2012, Pages 933-939

2. Kim, Young Hoon; Trejo, David; Atahan, Hakan N.; et al., Mechanical Property Prediction for High Early Strength Self-Consolidating Concrete, JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING Volume: 24 Issue: 12 Pages: 1501-1512 Published: DEC 2012

3. Radhika, K. L.; Kumar, P. Rathish; Rao, S. V.; et al., Mix design methodology for fibrous self compacting concrete based on compressible packing model (CPM), CEMENT WAPNO BETON Volume: 17 Issue: 5 Pages: 310-+ Published: SEP-OCT 2012

4. Jimenez, J. R.; Ayuso, J.; Galvin, A. P.; et al., Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads, CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS Volume: 34 Pages: 34-43 Published: SEP 2012
5. Kaveh, A.; Massoudi, M. S., COST OPTIMIZATION OF A COMPOSITE FLOOR SYSTEM USING ANT COLONY SYSTEM, IRANIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY-TRANSACTIONS OF CIVIL ENGINEERING Volume: 36 Issue: C2 Pages: 139-148 Published: AUG 2012
6. Muigai, R.; Moyo, P.; Alexander, M., Durability design of reinforced concrete structures: a comparison of the use of durability indexes in the deemed-to-satisfy approach and the full-probabilistic approach, MATERIALS AND STRUCTURES Volume: 45 Issue: 8 Pages: 1233-1244 Published: AUG 2012
7. Bazaz, Jafar Bolouri; Khayati, Mahmood, Properties and Performance of Concrete Made with Recycled Low-Quality Crushed Brick, JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING Volume: 24 Issue: 4 Pages: 330-338 Published: APR 2012
8. Neves, Rui; Branco, Fernando; de Brito, Jorge, About the statistical interpretation of air permeability assessment results, MATERIALS AND STRUCTURES Volume: 45 Issue: 4 Pages: 529-539 Published: APR 2012
9. Tanesi, J.; Silva, M. G. da; Gomes, V., Guidelines for the development of concrete performance-based specifications in Brazil, Diretrizes para o desenvolvimento de especificações por desempenho para concretos no Brasil, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais Volume: 5 Issue: 2 Pages: 219-228 Published: 2012-04
10. Radlinska, Aleksandra; Weiss, Jason, Toward the Development of a Performance-Related Specification for Concrete Shrinkage, JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING Volume: 24 Issue: 1 Pages: 64-71 Published: JAN 2012
11. Marques, Pedro F.; Costa, Antonio; Lanata, Francesca, Service life of RC structures: chloride induced corrosion: prescriptive versus performance-based methodologies, MATERIALS AND STRUCTURES Volume: 45 Issue: 1-2 Pages: 277-296 Published: JAN 2012
12. M. T. Bassuoni, M. L. Nehdi, Resistance of self-consolidating concrete to ammonium sulphate attack, Materials and Structures (2012)

2011

1. Gjorv, Odd E., Durability of Concrete Structures, ARABIAN JOURNAL FOR SCIENCE AND ENGINEERING Volume: 36 Issue: 2 Pages: 151-172 Published: MAR 2011
2. Fernando Pacheco Torgal, Said Jalali Durability of Binder Materials, Chapter in Eco-efficient Construction and Building Materials (2011)
3. CIA, Performance-based Specifications for Sulfate Resisting Concrete, CIA Resource Center RSS, February 14, 2011
4. Mark F. Chrzanowski, Performance-Based Requirements for Concrete, Concrete International, Volume: 33, Issue: 5, May 1, 2011

5. A. Younsi, P. Turcry, E. Rozière, A. Aït-Mokhtar, A. Loukili, Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content, *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 993–1000.

2010

1. P.F. Marques, A. Costa, Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies, *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 3, March 2010, Pages 258-265

2. M. O'Connell, C. McNally, M.G. Richardson, Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review, *Cement and Concrete Composites*, Volume 32, Issue 7, August 2010, Pages 479-485

3. Dehn, Frank, New fib TG 8.10: Performance-based specifications for concrete, *STRUCTURAL CONCRETE* Volume: 11 Issue: 3 Pages: 171-172 Published: SEP 2010

4. O'Connell, M.; McNally, C.; Richardson, M. G., Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review, *CEMENT & CONCRETE COMPOSITES* Volume: 32 Issue: 7 Pages: 479-485 Published: AUG 2010

5. Recycled aggregates in concrete: a performance-related approach, Paine, K. A.; Dhir, R. K. *MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH* Volume: 62 Issue: 7 Pages: 519-530 Published: JUL 2010

6. Settimi, Alessandro; Zirizzotti, Achille; Baskaradas, James A.; et al., Inaccuracy assessment for simultaneous measurement of resistivity and permittivity applying sensitivity and transfer function approaches, *ANNALS OF GEOPHYSICS* Volume: 53 Issue: 2 Pages: 1-19 Published: 2010

7. Mark G. Alexander, Manu Santhanam, Durability design and specification for concrete structures—the way forward, *International Journal of Advances in Engin* (2010)

8. C.-M. Aldea, B. Shenton, and B. Cornelius, Performance-Based Specifications and Sustainable Development Using Slag Cement, *ACI Special Publication*, Volume: 269, March 1, 2010

9. K. H. Obla, Performance-Based Specifications for Concrete to Advance Sustainable Development, *ACI Special Publication*, Volume: 269, April 30, 2010

10. Luc Van der Heyden, Technical specifications of matrix raw materials for Hatschek technology based fibre cement – A pragmatic approach, *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 2, February 2010, Pages 147-157

2009

1. E. Rozière, A. Loukili, F. Cussigh A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 1, January 2009, Pages 190-199

2. M.T. Bassuoni, M.L. Nehdi, Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading, Cement and Concrete Research, Volume 39, Issue 3, March 2009, Pages 206-226
3. E. Rozière, A. Loukili, R. El Hachem, F. Grondin, Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks, Cement and Concrete Research, Volume 39, Issue 12, December 2009, Pages 1188-1198
4. V. Baroghel-Bouny, T.Q. Nguyen, P. Dangla, Assessment and prediction of RC structure service life by means of durability indicators and physical/chemical models, Cement and Concrete Composites, Volume 31, Issue 8, September 2009, Pages 522-534
5. Empelmann, M.; Heumann, G., Durability-Related Specifications for Concrete Bridge Structures, BAUINGENIEUR Volume: 84 Pages: 438-446 Published: OCT 2009

2008

1. R.D. Hooton, Bridging the gap between research and standards, Cement and Concrete Research, Volume 38, Issue 2, February 2008, Pages 247-258
2. Arnon Bentur, Denis Mitchell, Material performance lessons, Cement and Concrete Research, Volume 38, Issue 2, February 2008, Pages 259-272
3. Nor Ashidi Mat Isa, M. Subhi Al-Batah, Kamal Zuhairi Zamli, Khairun Azizi Azizli, Ariffuddin Joret, Nor Rizuan Mat Noor, Suitable features selection for the HMLP and MLP networks to identify the shape of aggregate, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 3, March 2008, Pages 402-410
4. Electrical Resistivity Measurements for Quality Control During Concrete Construction, By: Sengul, Ozkan; Gjorv, Odd E., ACI MATERIALS JOURNAL Volume: 105 Issue: 6 Pages: 541-547 Published: NOV-DEC 2008
5. Bentz, Dale P.; Sant, Gaurav; Weiss, Jason, Early-age properties of cement-based materials. I: Influence of cement fineness, JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING Volume: 20 Issue: 7 Pages: 502-508 Published: JUL 2008
6. Alexander, M. G., Ballim, Y.; Stanish, K., A framework for use of durability indexes in performance-based design and specifications for reinforced concrete structures, MATERIALS AND STRUCTURES Volume: 41 Issue: 5 Pages: 921-936 Published: JUN 2008
7. M. L. Nehdi, M. T. Bassuoni, Durability of self-consolidating concrete to combined effects of sulphate attack and frost action, Materials and Structures (2008)

2007

1. Tanesi, Jussara; Kutay, M. Emin; Abbas, Ala; et al., Effect of coefficient of thermal expansion test variability on concrete pavement performance as predicted by mechanistic-empirical pavement design guide, TRANSPORTATION RESEARCH RECORD Issue: 2020 Pages: 40-44 Published: 2007
2. Maekawa K, Ishida T, Chijiwa N. Computational life-cycle assessment of structural concrete subjected to coupled severe environment and mechanistic actions. In: Toutlemonde

F, Sakai K, Gjrv OE, Banthia N, editors. Proceedings of the fifth international conference on concrete under severe conditions: environment and loading (CONSEC'07), June 4–6, 2007, Tours, France, vol. 1. Paris: LCPC; 2007. p. 3–18.

2006

1. Guoxue Zhang, Jianxia Song, Jiansen Yang, Xiyuan Liu, Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand, *Building and Environment*, Volume 41, Issue 11, November 2006, Pages 1478-1481
2. Miyagawa, Toyo, Maintenance of concrete structures in Japan: current activities, *STRUCTURE AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING* Volume: 2 Issue: 2 Pages: 131-139 Published: JUN 2006
3. Hwang, SD; Khayat, KH; Bonneau, O, Performance-based specifications of self-consolidating concrete used in structural applications, *ACI MATERIALS JOURNAL* Volume: 103 Issue: 2 Pages: 121-129 Published: MAR-APR 2006
4. C. Andrade, Multilevel (four) methodology for durability design, in *Proceedings of the International RILEM Workshop "Performance based evaluation and indicators for concrete durability"*, Edited by V. Baroghel-Bouny, C. Andrade, R. Torrent, K. Scrivener, RILEM, 2006.
5. J. Gulikers, A critical review of mathematical modelling of chloride ingress into concrete and the derivation of input data, in *Proceedings of the International RILEM Workshop "Performance based evaluation and indicators for concrete durability"*, Edited by V. Baroghel-Bouny, C. Andrade, R. Torrent, K. Scrivener, RILEM, 2006.

2005

1. David W. Mokarem, Richard E. Weyers, D. Stephen Lane, Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures, *Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 5, May 2005, Pages 918-925
2. Stanish, K; Alexander, MG; Kellerman, J, The effect of elevated initial temperatures on durability index values of plain and corex slag concretes, *MATERIALS AND STRUCTURES* Volume: 38 Issue: 282 Pages: 747-753 Published: OCT 2005
3. Tikalsky, PJ; Pustka, D; Marek, P, Statistical variations in chloride diffusion in concrete bridges, *ACI STRUCTURAL JOURNAL* Volume: 102 Issue: 3 Pages: 481-486 Published: MAY-JUN 2005
4. High-performance concrete carpet: A hydraulic flexible wearing course - Part I - Design
By: de Larrard, F, *ROAD MATERIALS AND PAVEMENT DESIGN* Volume: 6 Issue: 4 Pages: 533-547 Published: 2005
5. L. Fernandez Luco, Comparative test—Part II—Comparative test of "covermeters", *Materials and Structures* (2005)
6. Nilsson L.O., Carcasses M., Models for chloride ingress into concrete – A critical analysis, Report on task 4.1, EU Project 'ChlorTest: Resistance of concrete to chloride ingress – From laboratory tests to in-field performance', G6RD-CT-2002-0085, Building Materials, Lund Institute of Technology, 2005, 69 p.

7. R. Romer, Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement, *Materials and Structures* 38 (2005) 541–547.

8. A. Aldykiewicz, N.S. Berke, R. Hoopes, L. Li, Long term behavior of fly ash and silica fume concretes in laboratory and field exposures to chlorides, in *Corrosion 2005, NACE Annual Conference*, NACE International Publication Division, Texas, USA, 2005, Paper No. 05252.

2004

1. M. J. McCarthy, A. Giannakou, M. R. Jones, Comparative performance of chloride attenuating and corrosion inhibiting systems for reinforced concrete, *Materials and Structures* (2004)

2. Peter Taylor, Performance-Based Specifications for Concrete, *Concrete International*, Volume: 26, Issue: 8, August 1, 2004

3. Bouzoubaa N., Bilodeau A., Sivasundaram V., Fournier B., Golden D.M., Developement of ternary blends for high-performance concrete, *ACI Mater. Journ.* 101 (1) (2004) 19-29.

4. Du Preez, A.A., Alexander M.G., A site study of durability indexes for concrete in marine conditions, *Mater. Struct.*, 37 (267) (2004) 146-154.

5. Saetta A.V., Vitaliani R.V., Experimental investigation and numerical modelling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: theoretical formulation, *Cem. Con. Res.* 34 (4) (2004) 571-579.

6. De Schutter G., and Audenaert K. (2004) Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration, *Materials and structures* 37, 591-596.

2003

1. G. Fornasier, C. Fava, L. F. Luco, and L. Zitzer, Design of Self Compacting Concrete for Durability of Prescriptive vs. Performance-Based Specifications, *ACI Special Publication*, Volume: 212, June 1, 2003

2002

1. F. de Larrard, T. Sedran Mixture-proportioning of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 32, Issue 11, November 2002, Pages 1699-1704

2. Marchand J., Samson E., Maltais Y., Lee R.J., Sahu S., Predicting the performance of concrete structures exposed to chemically aggressive environment – Field validation, *Mater. Struct.* 35 (2002) 623-631.

2001

1. Neville A., Consideration of durability of concrete structures: past, present and future, *Mater. Struct.* 34 (236) (2001) 114-118.

2. Tong L., Gjorv O.E., Chloride diffusivity based on migration testing, *Cem. Con. Res.* 31 (2001), 973-982.

3. Basheer L., Kropp J., Cleland D.J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review, *Construction and Building Materials* 15 (2001), 93-103.

2000

1. I. Dumitru, R. Munn, G. Smorchevsky, Progress towards achieving ecologically sustainable concrete and road pavements in Australia, *Waste Management Series, Volume 1*, 2000, Pages 107-120

2. M. R. Jones, R. K. Dhir, M. D. Newlands, A. M. O. Abbas, A study of the CEN test method for measurement of the carbonation depth of hardened concrete, *Materials and Structures* (2000)

3. Papadakis V.G., Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, *Cem. Con. Res.* 30 (10) (2000) 291-299

4. DuraCrete – Probabilistic performance based durability design of concrete structures: statistical quantification of the variables in the limit state functions, The Europea Union – BRITE-EURAM III, Report BE-1347/R9, prep. By TNO Building and Construct. Res., Gouda, The Netherlands (2000), 130 p.

5. Thomas M.D.A., Bentz E.C., 'Life-365 – Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides', 2000.

1999

1. Thomas M.D.A., Shehata M.H., Shashipradash S.G., Hopkins D.S., Cail K., Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete, *Cem. Con. Res.* 29 (1999) 1207-1214.

2. Gehlen C., Schiessl P., Probability-based durability design for the Western Scheldt Tunnel, *Struct. Con., Jour. of the fib* P1 (2) (1999) 1-7.

3. Alexander M.G., Magee B.J. Durability performance of concrete containing condensed silica fume, *Cement and Concrete Research* 29 (1999), 917-922.

1998

1. Yoshihiko Ohama, Polymer-based admixtures, *Cement and Concrete Composites*, Volume 20, Issues 2–3, 1998, Pages 189-212

1992

1. R.J. Torrent, A two chamber vacuum cell for measurement of the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures* 25 (1992) 358–365.

1991

1. Brian Wilkins, Guidelines for the selection of external protective wall finishes for smooth concrete surfaces in Hong Kong, Energy and Buildings, Volume 16, Issues 3–4, 1991, Pages 957-962

2. P. Livesey, A. Donnelly, C. Tomlinson, Measurement of the heat of hydration of cement, Cement and Concrete Composites, Volume 13, Issue 3, 1991, Pages 177-185

1988

1. D.W.S. Ho, R.K. Lewis, The specification of concrete for reinforcement protection—performance criteria and compliance by strength, Cement and Concrete Research, Volume 18, Issue 4, July 1988, Pages 584-594

1985

1. P.K. Mehta, Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures, Cement and Concrete Research, Volume 15, Issue 4, July 1985, Pages 669-674

1982

1. Tuutti K., Corrosion of steel in concrete, Report 4.82, Swedish cem. And Conc. Res. Inst. (CBI), Stockholm, Sweden (1982).

9.3 Annexe 3 : Proposition de la gamme de bétons à étudier (GT3)

Au cours de l'étude de faisabilité, il a été convenu qu'une approche performantielle doit permettre un niveau global de durabilité des bétons égal ou supérieur aux bétons réalisés aujourd'hui selon une approche prescriptive (obligation de moyens). Il est donc nécessaire d'établir une cartographie de la durabilité potentielle de ces bétons pour bâtir l'approche performantielle. L'approche prescriptive restant à ce jour la plus utilisée, il est possible de construire ces bases de données à partir d'études existantes (cf. groupe de travail AFGC « Base de données sur les seuils et les indicateurs de durabilité »).

Dans le programme expérimental du Projet National, il conviendrait donc de privilégier des bétons non conformes à l'approche prescriptive, dont la durabilité potentielle est moins bien connue. La répartition proposée dans cette première version (cf tableau ci-après) est de 20 compositions conformes aux spécifications prescriptives (tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206-1, 2012) et 17 non conformes (cellules mouchetées).

N° de compo	Dosage en L_{eq} (kg/m ³)	E_{eff}/L_{eq}	Nature du liant	A/(A+C)	PM/ES	Type de granulats	Classe de résistance	Entraineur d'air (>4% et <8%)	Volume de pâte	Respect des exigences de la norme NF EN 206-1	Classe d'exposition visée en priorité	Conformité (avérée ou visée) aux classes d'exposition :
1	280	0,60	CEM I			granulat 1	C25/30	non		Oui	XC4	XC, XD1, XF1
2	280	0,60	CEM I + 30 % de CV			granulat 1	C25/30	non		Oui, moindre durabilité	XC4	XC, XD1, XF1
3	280	0,60	CEM III/A non PM/ES		non	granulat 1	C25/30	non		OUI	XC4	XC, XD1, XF1
4	280	0,60	CEM III/A (sup à 60 % de laitier)		PM/ES	granulat 1	C25/30	non		OUI	XC4	XC, XD1, XF1
5	280	0,60	CEM I + 60 % laitier moulu	dérogé à NF EN 206-1		granulat 1	C25/30	non		non (A/(A+C))	XC4	XC, XD1, XF1
6	280	0,60	CEM I + 40 % addition calcaire	dérogé à NF EN 206-1		granulat 1	C25/30	non		non (A/(A+C))	XC4	XC, XD1, XF1
7	280	0,60	CEM I + 40 % addition calcaire	dérogé à NF EN 206-1		granulat 1	C25/30	non	Supérieur (BAP jusque 40 %)	non (A/(A+C))	XC4	XC, XD1, XF1
8	280	0,60	CEM II/A-L+ 30% de CV	dérogé à NF EN 206-1		granulat 1	C25/30	non		non (A/(A+C))	XC4	XC, XD1, XF1
9	280	0,60	CEM II/A-L+ 45% laitier	dérogé à NF EN 206-1		granulat 1	C25/30	non		non (A/(A+C))	XC4	XC, XD1, XF1
10	280	0,65	CEM I	dérogé à NF EN 206-1		granulat 1	C25/30	non		non (rapport E_{eff}/L_{eq} plus élevé)	XC4	XC, XD1, XF1
11	280	0,60	CEM I	dérogé à NF EN 206-1		granulat 1 bis (enlever une coupure)	C25/30	non		non, pas de correction en fonction du D_{max} (dérogation du dosage en liant équivalent)	XC4	XC, XD1, XF1
12	330	0,55	CEM I + 30 % de CV		PM	granulat 1	C30/37	non		Oui	XS2	XC, XD1, XS1, XS2, XF1
13	330	0,55	CEM II/A-LL		PM	granulat 1	C30/37	non		Oui, moindre durabilité	XS2	XC, XD1, XS1, XS2, XF1
14	330	0,55	CEM I + 60 % laitier moulu	dérogé à NF EN 206-1	PM	granulat 1	C30/37	non		non (A/(A+C))	XS2	XC, XD1, XS1, XS2, XF1
15	330	0,55	CEM I + 30 % addition calcaire	dérogé à NF EN 206-1	PM	granulat 1	C30/37	non		non (A/(A+C))	XS2	XC, XD1, XS1, XS2, XF1
16	dérogé à NF EN 206-1	0,55	CEM I		PM	granulat 1	C30/37	non		non (Leq)	XS2	XC, XD1, XS1, XS2, XF1
17	350	0,50	CEM I + 30 % de CV		PM	granulat 1	C35/45	non		Oui	XS3	XC, XD, XS, XF1
18	350	0,50	CEM II/A-LL		PM	granulat 1	C35/45	non		Oui, moindre durabilité	XS3	XC, XD, XS, XF1
19	350	0,50	CEM I + 30 % de CV		PM	granulat 3	C35/45	non		OUI	XS3	XC, XD, XS, XF1, XA2
20	350	0,50	CEM I + 30 % de CV		PM	granulat 4	C35/45	non		OUI	XS3	XC, XD, XS, XF1, XA2
19	350	0,50	CEM I + 40 % de CV	dérogé à NF EN 206-1	PM	granulat 1	C35/45	non		non (A/(A+C))	XS3	XC, XD, XS, XF1
20	350	0,50	CEM I + 30 % addition calcaire	dérogé à NF EN 206-1	PM	granulat 1	C35/45	non		non (A/(A+C))	XS3	XC, XD, XS, XF1
21	dérogé à NF EN 206-1	0,50	CEM II/A-LL		PM	granulat 1	C35/45	non		non (Leq)	XS3	XC, XD, XS, XF1
22	350	0,50	CEM I + 30 % de CV		PM	granulat 2	C35/45	non		non (abs eau du granulat 2)	XS3	XC, XD, XS, XF1, XA2
25	350	0,50	CEM I + 30 % de CV		PM	granulat 5 (à définir par l'UNPG)	C35/45	non		?	XS3	XC, XD, XS, XF1, XA2
26	350	0,50	CEM I + 30 % de CV			granulat 1	Résistances du béton initial diminuées, C30/37 à minima	oui (6 %)		Oui	XF	XC, XD, XS, XF1
27	385	0,45	CEM I + 30 % de CV			granulat 1	Résistances du béton initial diminuées, C30/37 à minima	oui (6 %)		Oui	XF	XC, XD, XS, XF1

Bétons présentant une plus forte durabilité en raison d'une diminution du rapport E _{eff} /Liant _{eq} :											
28	360	0,45	CEM I + 30 % de CV		PM	Granulat 1	C40/50	non		Oui, durabilité élevée	XC, XD, XS, XF1
29	360	0,45	CEM II/A-LL		PM	Granulat 1	C40/50	non		Oui	XC, XD, XS, XF1
30	380	0,40	CEM I + 30 % de CV		PM	Granulat 1	C50/60	non		Oui, durabilité très élevée forte	XC, XD, XS, XF1
31	380	0,35	CEM I + 30 % de CV		PM	Granulat 1	C50/60	non		Oui, durabilité très élevée forte	XC, XD, XS, XF1
Bétons XA :											
32	360	0,45	CEM III/A (non PM/ES)		non	Granulat 1	C40/50	non		Oui, durabilité élevée	XC, XD, XS, XF1
33	360	0,45	CEM III/A (sup à 60 %)		PM/ES	Granulat 1	C40/50	non		Oui, durabilité élevée	XC, XD, XS, XF1
34	360	0,45	CEM V		PM/ES	Granulat 1	C40/50	non		Oui, durabilité très élevée forte	XC, XD, XS, XF1
Bétons complémentaires											
35	380	0,35	CEM I + 10 % de FS			Granulat 1	C50/60	non		Oui, durabilité très élevée forte	XC, XD, XS, XF1
36	280	0,60	CEM I + 20 % de métakaolin			Granulat 1	C25/30	non		Non (taux d'addition)	XC, XD, XS, XF1
37	280	0,60	CEM I + 30 % d'addition siliceuse			Granulat 1	C25/30	non		Non (taux d'addition)	XC, XD, XS, XF1

Les bétons du tableau ne constituent pas des « Bétons de référence » au sens de l'approche performantielle comparative, car ce sera justement un des objectifs du Projet que de définir la méthodologie de choix de ces bétons. Il s'agit des bétons qui constituent le plan d'expérience principal du Projet National Perfdub.

Les bétons proposés couvrent les classes d'exposition XC, XD, XS, XF et XA (distinction par couleur). Ils feront l'objet d'une caractérisation complète : porosité, absorption d'eau, perméabilité, carbonatation naturelle et accélérée, coefficient de diffusion des chlorures, résistivité.

Les classes XF feront l'objet d'un plan d'expériences spécifiques mais le tableau comprend des bétons (26 et 27) conformes afin d'évaluer l'influence de l'entraînement d'air sur les autres indicateurs de durabilité. La classe XF2 n'est pas traitée directement car les exigences pour XF2 et XF3 diffèrent peu (NF EN 206-1/CN, 2012).

Les classes XA feraient également l'objet d'un plan d'expériences spécifiques. Les bétons 32, 33 et 34 conformes permettront d'évaluer la sensibilité des essais et indicateurs (hors résistance aux attaques chimiques) à des variations sur la nature du liant et au rapport E_{eff}/Liant_{eq}.

Le fait d'identifier un groupe de bétons à étudier dans le plan d'expérience principal n'exclut pas la réalisation de plans d'expériences complémentaires sur d'autres compositions, en nombre plus limité, pour préciser certains points tels que l'influence des granulats, des additions, des ciments, des adjuvants...

Dans cette première version, le tableau donne au moins deux compositions conformes aux spécifications prescriptives pour chaque classe d'exposition, afin de viser plusieurs niveaux de durabilité potentielle : moindre durabilité, durabilité conventionnelle, durabilité élevée.

Parmi les bétons « non conformes » les variations concernent les paramètres retenus au cours de l'étude de faisabilité, tout en limitant le nombre de bétons à 37.

9.3.1 Rapport E_{eff} /Liant éq.

Les valeurs du rapport correspondent aux valeurs limites figurant dans le tableau NA.F.1 : 0,65 – 0,60 – 0,55 – 0,50 – 0,45. Le béton 10 de rapport E_{eff} /Liant éq. = 0,65 permettra d'évaluer la sensibilité des essais et la capacité de l'approche performantielle à écarter des bétons a priori moins durables. Des bétons plus performants de rapport E_{eff} /Liant éq. = 0,40 sont inclus (28, 29, 30 et 31). En les comparant à d'autres bétons, des conclusions sur l'influence du rapport E_{eff} /Liant éq. ou la nature du liant pourront être tirées.

9.3.2 Dosage en liant équivalent et volume de pâte

Les variations du dosage en liant équivalent (280 / 315 /330 / 340/ 350 / 360 / 380 kg/m³) se traduisent indirectement par des variations du volume de pâte.

Afin d'évaluer l'influence du volume de pâte pour les bétons de rapport E_{eff} /Liant éq. élevé, le tableau comporte un BAP (béton 7).

9.3.3 Proportion et nature des additions minérales

La nature des additions dans les compositions dérogeant aux valeurs limites du tableau NA.F.1 est précisée :

- Cendres volantes
- Laitier
- Fumées de silice
- Métakaolin
- Addition calcaire
- Addition siliceuse

La nature des additions varie en fonction des classes d'exposition et des niveaux de durabilité potentielle visés.

9.3.4 Nature du ciment

La nature des ciments des compositions conformes est donnée : CEM I, CEM I PM, CEM III/A-LL, CEM III/A, CEM III/A PM ES, CEMV.

9.3.5 Nature des granulats

Toutes les compositions sont prévues avec des granulats de caractéristiques indicées A ou B, exceptées une composition dérivée de la composition 19 de classe de résistance C35/45 : la composition 20 avec des granulats C ou D. En effet, selon la norme NF EN 206-1/CN, *pour les bétons de classe de résistance caractéristique en compression C35/45 ou plus, les granulats doivent présenter des caractéristiques indicées A ou B. Des granulats présentant au plus deux caractéristiques indicées C ou D peuvent être admis après études ou références.*

Les granulats retenus auront les caractéristiques indiquées dans le tableau ci-dessous :

	G1	G2	G3	G4
Nature minéralogique	Silico-calcaire	Silico-calcaire	Calcaire	Basalte
Forme	Semi-concassé	Semi-concassé	Semi-concassé ou concassé	Semi-concassé ou concassé
Absorption (code)	2-2,5 % (A)	4-5 % (B)	2-2,5 % (A)	< 1 %
Fines	< 3-4 %	< 3-4 %	< 3-4 %	< 3-4 %
D _{max} (mm)	20 G1bis : 10	20	20	20

Extrait de 5.1.3 Granulats de NF EN 206-1/CN

NA.5.1.3 Granulats

En référence à la note de 5.1.1, l'aptitude générale à l'emploi est établie en France pour les granulats conformes aux normes NF EN 12620 ou NF EN 13055-1 (pour les granulats légers) et à la norme NF P 18-545, qui les complète, sous réserve de respecter les exigences suivantes :

- les granulats peuvent présenter au plus deux caractéristiques indicées D ;
- pour les bétons soumis à des environnements particulièrement agressifs (classes d'exposition XF4 et XA3), les granulats doivent présenter une absorption d'eau indiquée A (sauf justification particulière fondée sur des essais de laboratoire ou des références probantes d'emploi) et leurs autres caractéristiques doivent être au minimum indicées B ;
- pour les bétons de classe de résistance caractéristique en compression C35/45 ou plus, les granulats doivent présenter des caractéristiques indicées A ou B. Des granulats présentant au plus deux caractéristiques indicées C ou D peuvent être admis après études ou références.

Pour les classes XF3 et XF4, les granulats doivent être non gélifs au sens de la norme NF P 18-545.

Les granulats recyclés doivent être conformes aux spécifications des normes NF EN 12620 et NF P 18-545, complétées par les dispositions suivantes.

9.4 Annexe 4 : Présentation du projet de recherche ANR « Modevie »

MODEVIE – Mobilité et systèmes urbains durables – 2014 Modélisation du vieillissement des ouvrages en béton

Résumé

La première cause de dégradation des ouvrages en béton armé est la corrosion des armatures provoquée par les agents agressifs du milieu extérieur comme le dioxyde de carbone et les ions chlorures. Maîtriser la durée de vie des ouvrages signifie donc contrôler dès la conception le risque de corrosion. L'enjeu est bien sûr économique car la maintenance d'un patrimoine bâti vieillissant coûte cher aux maîtres d'ouvrages. Il est aussi environnemental car l'utilisation du béton a un impact à l'échelle de la planète (8% des émissions de gaz à effet de serre) ou à une échelle locale (consommation des ressources en granulats).

Dans la réglementation actuelle, la maîtrise de la durée de vie passe par une obligation de moyens. Les normes imposent par exemple un enrobage minimal des armatures ou un dosage minimal en liant dans la composition du béton. Dans les prochaines années, l'approche dite performantielle qui consiste à considérer les performances réelles de la structure sera également intégrée dans les normes comme une autre voie pour définir la composition des bétons. Il est possible d'évaluer les performances du béton à l'aide d'essais de vieillissement accéléré ou d'indicateurs de durabilité. En France, il existe des méthodes d'application d'une approche performantielle de la durabilité. Un projet national, PERFDUB en cours de montage, doit rassembler la plupart des acteurs de la construction pour asseoir ces méthodes et proposer une méthodologie globale.

Pour accroître la robustesse de l'approche performantielle basée sur des essais ou des indicateurs de durabilité il est nécessaire de s'appuyer aussi sur des outils de modélisation permettant de prédire le comportement à long terme des structures en béton armé.

Ces dernières années ont vu beaucoup de progrès dans la modélisation des phénomènes physico-chimiques et mécaniques agissant sur la durabilité du béton armé. Néanmoins, les modèles actuels sont bien souvent focalisés sur une seule des phases du processus de corrosion, par exemple sur la phase de pénétration des agents agressifs ou sur la phase de propagation de la corrosion. L'ambition du projet MODEVIE est d'une part de regrouper ces différentes étapes de la vie d'un ouvrage en chainant les modèles de comportement, du transfert des espèces jusqu'à la corrosion et aux dégradations mécaniques associées et d'autre part d'aboutir à un modèle de type « ingénieur » utilisable pour l'approche performantielle dans le contexte normatif par les acteurs de la construction. Le projet MODEVIE doit aussi permettre une meilleure compréhension des paramètres favorables à la dépassement des aciers et à la propagation de la corrosion. Il s'agit ainsi de définir de manière rationnelle des états limites associés à la corrosion des armatures.

Organisé en 6 tâches, le projet associera modélisation et expérimentations. Ces dernières permettront de prendre en compte des paramètres tels que la mise en œuvre, la nature des granulats et la nature du liant. Seront ainsi étudiés des matériaux potentiellement qualifiés par l'approche performantielle (bétons à teneur élevée en addition minérale ou en granulats recyclés). Le projet aboutira à la définition d'un modèle de calcul type « ingénieur » de la durée de vie pour un type d'état-limite défini (correspondant à un stade de corrosion acceptable) en fonction des paramètres de formulation, de mise en œuvre, des conditions d'environnement et exploitable par les utilisateurs finaux à partir de données accessibles par des essais normalisés.

L'un des points forts du projet MODEVIE est de réunir des partenaires spécialistes des phénomènes de transfert et de corrosion et du contexte normatif afférant à la durabilité des ouvrages en béton, tous impliqués dans la mise en œuvre de l'approche performantielle,

qu'ils s'agissent de laboratoires universitaires (LaSIE, GeM, LMDC), de laboratoires publics (IFSTTAR, CEREMA) ou privés (LAFARGE, EUROVIA, VINCI Construction France, CERIB).

ABSTRACT

In most cases, the deterioration of reinforced concrete structures is due to corrosion caused by aggressive agents from the external environment such as carbon dioxide and chloride ions. In order to control the lifetime of structures, efforts have to be made to manage the risk of corrosion from the structure design. This is of course an economic challenge since the maintenance of ageing concrete structures is nowadays more and more costly for owners. It is also an environmental challenge because, like other materials, the use of concrete has impacts at global scale (8% of the worldwide greenhouse gas emissions) or at local scale (natural aggregates consumption).

In the current design standards, the control of structures lifetime is done through an obligation of means. For instance, the European standards require a minimum cover of reinforcement or a minimum binder content in the concrete composition. In the coming years, the performance-based approach will be introduced as a second way to design the concrete formulation. Concrete performances can be assessed through accelerated ageing tests or durability indicators. In France, application methods of the performance-based approach are available. A national project under construction (PERFDUB) shall gather most of construction actors to optimize these methods and use it in a global approach.

To determine the threshold values of durability properties measured by tests, the performance-based approach need modeling tools which are able to predict the long-term behavior of reinforced concrete structures. The models will be used to quantify the durability indicators and to verify the reliability of the values. The objective of the project MODEVIE is to provide such models applicable by end-users in the frame of the performance-based approach.

In recent years, many progresses have been done in the modeling of physical, chemical and mechanical phenomena acting on the durability of reinforced concrete. However, the existing models are often focused on only one of the stages of corrosion process, for instance on the stage of aggressive agents transfers or on the phase of corrosion propagation. The aims of MODEVIE is first to take into account all the different periods of the structure life in chaining behavior models, from transfers to corrosion and mechanical damage, and secondly to define a model adapted to the use of the performance-based approach in the normative context. MODEVIE will also provide a better understanding of parameters favorable to steel reinforcement depassivation and corrosion propagation. Limit states associated with reinforcement corrosion will be also rationally defined.

Organized into six tasks, the project will involve modeling and experiments. The latter will take into account parameters such as concrete casting, aggregates nature and binder type. We will study concretes potentially qualified by the performance-based approach, i.e. concretes with high content of mineral addition or recycled aggregates. Finally, MODEVIE will lead to the definition of an "engineer" type model usable by end-users for the calculation of the structure lifetime for a given limit state (corresponding to an acceptable corrosion state). The entry parameters will be the concrete mix parameters, environmental conditions and materials data available from standard tests.

MODEVIE gathers specialists partners in the fields of mass transfer, corrosion and normative context for the durability of concrete structures, which are all involved in the development of the performance-based approach for concrete structures: university laboratories (LaSIE, GeM, LMDC), public laboratories (IFSTTAR, CEREMA) or private (LAFARGE, Eurovia, VINCI Construction France, CERIB).

Objectifs globaux, verrous scientifiques/techniques

Le Projet MODEVIE concerne la conception et la gestion des ouvrages en béton armé vis à vis de la corrosion des aciers et se donne comme objectifs globaux ce qui suit :

- Proposer des modèles de transfert d'agents agressifs (ions chlorures, CO_2 et ions sulfates) conduisant à la corrosion des aciers. Ces modèles (déterministes ou probabilistes) qu'on peut qualifier « d'utiles aux chercheurs » devraient permettre une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques à l'origine des dégradations liées à la corrosion des armatures.
- Montrer comment les modèles développés peuvent s'adapter pour être appliqués à travers l'approche performantielle en vue de la prédiction de la durée de vie des ouvrages en béton armé vis à vis de la corrosion des armatures.
- Etablir des paramètres de liaison entre l'initiation de la corrosion des armatures, son développement et la fissuration du béton.
- Evaluer de façon déterministe et probabiliste les indicateurs de vieillissement : pertes de section d'armature et d'adhérence acier et béton, apparition de fissures.
- Mettre à disposition des acteurs de la construction des outils simples adaptés à l'application de l'approche performantielle à la prédiction du vieillissement des structures en béton armé dans le contexte normatif.

Pour atteindre les objectifs précédemment décrits, d'un point de vue académique et industriels, il est nécessaire d'identifier des verrous scientifiques dont les principaux sont :

- Modéliser la phase d'initiation de la corrosion sous sollicitations couplées carbonatation –chlorures en milieu partiellement saturé en utilisant comme données d'entrée les indicateurs de durabilité utilisés dans l'approche performantielle;
- Modéliser l'influence des réactions chimiques entre la matrice cimentaire et les espèces chimiques agressives (CO_2 , chlorures, sulfates) sur la porosité et le coefficient de diffusion des bétons dégradés, en prenant en compte son éventuelle fissuration.
- Intégrer dans les calculs prédictifs la porosité de la matrice cimentaire, mais également celle des granulats ;
- Faire évoluer les modèles pour prendre en compte les paramètres liés à la mise en œuvre ;
- Préciser comment les modèles peuvent contribuer à la prise en compte de la variabilité des propriétés de durabilité du béton dans les méthodologies de l'approche performantielle ;
- Modéliser les états limites de corrosion en présence de chlorures et de carbonatation ;
- Disposer d'un modèle permettant de déterminer à partir d'essais de carbonatation accéléré un coefficient de diffusion du CO_2 nécessaire à l'étude du couplage transfert de chlorures et carbonatation.

Pour satisfaire les besoins des acteurs de la construction en général et des ingénieurs en particulier, il est également important d'identifier des verrous techniques qui peuvent se résumer à :

- Définir à partir des modèles « utiles aux chercheurs » un modèle simple accessible aux ingénieurs en vue de l'application de l'approche performantielle dans un premier temps à des éléments de structures subissant une dégradation par des essais de laboratoire (couplage carbonatation et brouillard salin)
- Définir un modèle « ingénieur » permettant de prendre en compte différents niveaux de dégradation des structures vis-à-vis de la corrosion des armatures dans un cadre état limite selon le schéma suivant :
 - ELS « A » : problème purement d'aspect ;
 - ELS « F » : problème de fonctionnement (déformation excessive) ;

ELU « I » : problème d'intégrité mécanique de la structure.

- Proposer pour chaque EL des indices cibles croissants en fonction de la gravité des conséquences de la corrosion des aciers
- Appliquer l'approche performantielle à des cas réels. Ceci pourrait se faire en se basant sur des données qui seront collectés dans le cadre du Projet National PERFDUB, ou déjà disponibles (pour la phase de propagation de la corrosion), en particulier dans le cadre des projets ANR APPLLET et MCV d'IFSTTAR.

Programme de travail :

Le projet MODEVIE comporte 6 tâches :

■ Tâche 1 : Recensement et analyse des modèles

De nombreux modèles de durabilité ont été développés pour prévoir la pénétration d'espèces chimiques à l'origine de la corrosion des armatures (essentiellement le dioxyde de carbone et les ions chlorure). L'objectif de la tâche 1 est de réaliser une synthèse des modèles de durabilité et de préciser comment les modèles de durabilité peuvent contribuer à l'élaboration et à l'utilisation d'une approche performantielle robuste.

■ Tâche 2 : Identification des besoins spécifiques en modélisation en vue d'une utilisation dans l'approche performantielle

L'objectif de cette tâche, qui sera réalisée en parallèle avec la première, est de mener une réflexion sur les besoins en modélisation. Dans le contexte spécifique de l'approche performantielle, le recours à des modèles prédictifs amène un certain nombre de questions concernant en particulier les indicateurs de durabilité à retenir, la prise en compte des paramètres liés à la mise en œuvre et aux conditions environnementales.

■ Tâche 3 : Modélisation de la phase d'initiation de la corrosion GT1

La tâche 3 du projet s'intéresse aux deux premières phases du processus de corrosion d'une structure en béton armé : la phase de transferts des espèces agressives dans le béton d'enrobage (phase d'incubation) et la phase d'initiation de la corrosion.

- Tâche 3.1. Modélisation de la phase d'incubation
- Tâche 3.2. Caractérisation du béton d'enrobage
- Tâche 3.3. Coefficient de diffusion du CO₂
- Tâche 3.4. Influence de la structure poreuse des granulats
- Tâche 3.5. Initiation de la corrosion : modélisation et expérimentations
- Tâche 3.6. Campagnes expérimentales de validation des modèles

■ Tâche 4 : Modélisation de la phase de propagation de la corrosion en présence de chlorures et de carbonatation

Cette tâche traite des effets postérieurs à la dépassivation des armatures, elle-même traitée dans la tâche 3, dans le cas d'une exposition couplée à la carbonatation et aux chlorures.

- Tâche 4.1 Confrontation des modèles de corrosion aux données expérimentales
- Tâche 4.2 Investigation expérimentale sur le lien comportement structural / cinétique de corrosion
- Tâche 4.3 Définition des marges de sûreté associées aux états limites de corrosion
- Tâche 4.4 Etude de sensibilité des marges de sûreté
- Tâche 4.5 Etude probabiliste

■ Tâche 5 : Définition d'un modèle ingénieur commun adapté à l'approche performantielle

Il s'agit de définir un modèle global permettant de calculer une durée de vie, pour des états-limite définis (qui correspond à un stade de corrosion acceptable), en fonction des paramètres de formulation, de mise en œuvre (incluant l'enrobage et la cure) et des conditions d'environnement. Ce modèle pourra s'appliquer aussi bien à la conception d'ouvrages neufs qu'à la maintenance d'ouvrages anciens (gestion du parc existant).

■ Tâche 6 : Etude de cas réels.

L'étude de cas réels a pour objectif la validation du modèle ingénieur développé en tâche 5 et, si nécessaire, la validation des modèles élémentaires ayant permis d'aboutir au modèle ingénieur global.

Les cas réels étudiés correspondent à des retours d'expérience sur ouvrages anciens, déjà disponibles ou collectés dans le cadre du Projet National Perfdub qui devrait se dérouler en parallèle du projet MODEVIE (la réalisation de ce Projet National constitue un apport supplémentaire, mais non indispensable, pour les études menées par le projet MODEVIE).

Retombées scientifiques, techniques, économiques

Parmi le patrimoine d'ouvrages, celui des structures en béton est le plus grand en nombre et en impact sur les infrastructures et le milieu urbain. La maîtrise du vieillissement de ces ouvrages revêt donc un enjeu économique majeur au moment où leur âge moyen va imposer de faire des choix importants concernant leur maintenance, le prolongement de leur durée de vie ou leur remplacement.

Le retour d'expérience montre que la meilleure gestion de la maintenance des structures vieillissantes, dans un contexte de développement durable, nécessite des outils performants de prédiction de la performance et de la durée de vie des structures. Par ailleurs, le développement de tels outils est également aujourd'hui un enjeu important qui émerge lors de la construction d'ouvrages neufs pour lesquels la pérennité économique du projet dépend aussi des coûts de maintenance. De nombreux exemples montrent que pour le patrimoine bâti au 20ème siècle, les coûts de réparation prévisibles ont un impact déterminant sur la valeur de certains édifices de manière importante.

D'autre part, il est aujourd'hui techniquement possible de réduire significativement l'impact environnemental des bétons (par exemple, une réduction de 30% à 50% du facteur d'émission de CO₂) grâce à une utilisation optimale des matériaux locaux (granulats, ciments, additions) et des adjuvants modernes (qui permettent de réduire le dosage en eau des bétons et donc d'assurer une compacité élevée propice à une bonne durabilité). On peut également noter que les voies permettant la réduction de l'impact environnemental des bétons contribuent également à une réduction des coûts grâce à l'utilisation de matériaux recyclés et/ou à la réduction des distances de transport qui représentent une part considérable de l'économie des ouvrages en béton. La possibilité d'optimiser à la fois l'empreinte environnementale et le coût de la construction fait de l'approche performantielle un sujet particulièrement important pour le domaine du bâtiment et du génie civil.

Ces divers constats montrent qu'il est aujourd'hui nécessaire, pour les différents acteurs de la filière génie civil et construction des bâtiments, d'aborder le cycle de vie des ouvrages et leur durée de vie de manière plus efficace, rationnelle et pertinente. Une telle action est aujourd'hui un passage obligé pour à terme, optimiser leur maintenance en accord avec une stratégie de développement durable.

De plus il est important à présent de regrouper les différentes étapes de vie d'un ouvrage en béton et de chaîner les modèles en partant du transfert d'espèces puis en passant à la dépassivation des armatures, à leur corrosion et aux dégradations mécaniques associées.

Le projet MODEVIE a pour ambition d'asseoir les fondements de l'approche performantielle, pour ce qui concerne la corrosion des armatures, afin de valider une telle méthodologie et de mettre à disposition des acteurs de la construction les outils développés. Outre son intérêt pour l'approche performantielle, le développement d'outils prédictifs performants et robustes permettra d'optimiser également les spécifications définies dans les normes pour les bétons courants majoritairement utilisés actuellement dans le BTP.

Une présentation finale du projet sera préparée collectivement par l'ensemble des partenaires puis restituée dans le cadre de 5 présentations régionales (Ile de France, Nantes, Toulouse, Lyon, Lille) afin d'essayer notre démarche et le (ou les) modèles développés auprès de l'ensemble des acteurs de la filière génie civil. Ces journées de

restitution s'adresseront entre autres aux maîtres d'ouvrage, aux entreprises, aux enseignants, aux élèves-ingénieurs ...

9.5 Annexe 5 : Projet de charte du PN PERFDUB