



Prévenir les désordres,
améliorer la qualité
de la construction

PÔLE
PRÉVENTION
CONSTRUCTION

Septembre 2021

BÉTON BAS CARBONE PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Étude réalisée en partenariat avec SETEC-LERM



Avec le soutien du Ministère de la Transition Écologique



Rapport rédigé avec l'appui des professionnels concernés
et des filières de la construction

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
1. PANORAMA DES BÉTONS BAS CARBONE	7
1.1 Contextes réglementaire et normatif des bétons	7
1.2 Qu'est-ce qu'un béton bas carbone ?	7
1.3 Les différentes catégories de bétons bas carbone	13
2. RECOMMANDATIONS ET POINTS DE VIGILANCE	17
2.1 Au stade de la conception	17
2.2 Spécification des bétons	17
2.3 Au stade fabrication et mise en œuvre	18
2.4 Durabilité	19
2.5 Assurabilité	20
ANNEXE	21

AVANT-PROPOS

Ce document est destiné en priorité aux professionnels de la construction (aménageurs, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entrepreneurs et artisans...) qui participent à des opérations de construction destinées à des bâtiments tertiaires, des établissements recevant du public et à de l'habitat collectif et individuel. Il a pour objectif de réaliser un panorama des bétons à empreinte carbone réduite, d'identifier les points sensibles quant à la conception et à la mise en œuvre de ces matériaux et enfin d'émettre des recommandations quant à leurs usages.

N.B. : les bétons biosourcés ne rentrent pas dans le champ de l'étude.

Ce document ne se substitue pas aux réglementations et Règles de l'art relatives aux différentes parties d'ouvrage abordées dans ce rapport.

PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DE CETTE ÉTUDE

- 1** Dans le contexte actuel de recherche de réduction des Émissions de Gaz à Effet de Serre (Eges), notamment pour les constructions neuves avec la RE2020, les bétons bas carbone sont attendus par la filière construction.
- 2** L’empreinte carbone des bétons provient principalement du liant utilisé et de sa teneur en clinker pour lequel les Eges liées à sa production sont très élevées.
- 3** La notion de béton « bas carbone » ne fait pas encore l’objet d’une définition officielle s’appuyant sur un cadre normatif ou réglementaire.
- 4** On considère qu’un « béton bas carbone » correspond à un béton qui, pour des performances équivalentes, génère des Eges inférieures à celles d’un béton de référence. Il n’y a pas de règle commune sur le béton de référence qui peut être un béton formulé avec un CEM I ou un béton couramment utilisé dans le bâtiment à base de CEM II.
- 5** Pour réduire l’empreinte carbone d’un béton, plusieurs leviers sont possibles : diminuer la proportion de clinker du liant, réduire l’empreinte carbone du clinker (optimisation énergétique, stockage et piégeage du CO₂), utiliser de nouveaux liants.
- 6** 4 grandes catégories de béton « bas carbone » peuvent être distinguées : les bétons aux Eges réduites mais conformes à leurs normes (NF EN206/CN, normes produits préfabriqués), les bétons validés par une approche performantielle, les bétons de laitier activé et enfin les bétons émergents formulés à partir de nouveaux liants comme les liants géopolymères.
- 7** Le choix d’une solution béton bas carbone doit s’inscrire dans une réduction de l’empreinte carbone à l’échelle du bâtiment et s’intégrer dans une optimisation du dimensionnement de la structure et une rationalisation des ressources matériaux.
- 8** L’empreinte carbone d’un béton doit être ramenée à un service rendu (unité fonctionnelle) qui peut être multiple : résistance mécanique, comportement au jeune âge, durabilité et résistance aux environnements agressifs, performance thermique, fonction esthétique, résistance au feu... Il est ainsi essentiel de chercher le meilleur compromis performances / empreinte carbone pour une solution constructive donnée.
- 9** Par le biais d’optimisation dans leur formulation et d’évolutions normatives, des bétons bas carbone relevant des techniques courantes sont dès à présent disponibles et commercialisés. Leur utilisation n’entraîne pas d’évolution majeure des pratiques de chantier mais une vigilance particulière doit être portée au respect des conditions spécifiques de mise en œuvre et de cure (allongement cycles de décoffrage, sensibilité à la fissuration due au retrait, précautions d’usage en hiver) et à la formation des équipes.
- 10** L’utilisation des bétons bas carbone qui ne relèvent pas des normes actuelles est considérée comme une technique non courante. Dans ce cas, la chaîne d’acteurs (maître d’ouvrage, maître d’œuvre et entreprises) doit consulter en amont son assureur, respectivement Dommages-Ouvrage et Responsabilité Civile Décennale, pour vérifier l’assurabilité de la technique envisagée.
- 11** La disponibilité locale des matériaux constituant les bétons bas carbone peut être un frein à leur développement en masse à court terme.

INTRODUCTION

Au regard des objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050 de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), les acteurs français de la filière béton se sont engagés dans des études et travaux pour réduire leur empreinte carbone. Des opérations commencent également à être menées avec la mise en œuvre de béton bas carbone.

En parallèle, la France doit rester particulièrement attentive aux travaux normatifs européens sur le béton et l'acier notamment au regard de la réglementation environnementale (RE2020). Ainsi, la révision de la norme EN 16 757 « Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant la catégorie de produits pour le béton et les éléments en béton », vise à prendre en compte les évolutions de la norme EN 15 804 « Règles régissant les catégories de produits de construction ».

À ce jour, des incertitudes doivent encore être levées sur la définition des bétons bas et très bas carbone. De plus, un certain nombre de précautions doivent être prises avant d'effectuer des travaux qui mettent en œuvre ce type de béton.

Pour répondre à ces objectifs, un benchmark international, une étude bibliographique et des enquêtes auprès des professionnels ont été réalisés dans un premier temps. Suite à cette première phase, un panorama et une catégorisation des bétons bas et très bas carbone sont proposés et des recommandations et points de vigilance sont émis pour leur bonne mise en œuvre et leur tenue dans le temps. L'impact sanitaire de ces bétons est également évalué.



1. PANORAMA DES BÉTONS BAS CARBONE

1.1 Contextes réglementaire et normatif des bétons

Les bétons structuraux sont encadrés par un corpus de textes normatifs s'organisant comme suit :

- pour le dimensionnement :
 - Eurocode 0 : Bases de calcul
 - Eurocode 1 : Actions sur les structures
 - Eurocode 2 : Calcul des structures en béton
 - Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton
 - Eurocode 6 : Calcul des ouvrages en maçonnerie
 - Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes
- pour la définition des bétons :
 - NF EN 206/CN (décembre 2014) – Béton - Spécification, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206
 - Normes pour les produits préfabriqués, dont la norme NF EN 13 369 (novembre 2013) – Règles communes pour les produits préfabriqués en béton
- pour l'exécution :
 - NF EN 13 670/CN (février 2013, tirage 2 d'avril 2013). Exécution des structures en béton – Complément national à la NF EN 13 670 : 2013
 - NF DTU 20.1 - Travaux de bâtiment - Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs
 - NF DTU 21 – Travaux de bâtiment - Exécution des ouvrages en béton
 - NF DTU 23.1 - Travaux de bâtiment - Murs en béton banché

Ces référentiels s'appuient à leur tour sur des normes « produit » (ciments, granulats, armature, ...). Concernant les ciments, on citera les normes relatives aux ciments courants et aux ciments composés :

- NF EN 197-1 (avril 2012). Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ;
- NF EN 197-5 (mai 2021). Ciment – Partie 5 : ciment Portland composé CEM II/C-M et ciment composé CEM VI.

Dans le cas des bétons non structuraux mis en œuvre sur site, il n'y a pas systématiquement de cadre normatif ce qui apporte une liberté plus importante pour l'optimisation des dosages en liants, c'est notamment le cas des bétons de calage, de remplissage ou de comblement.

Dans le cas des produits préfabriqués non structuraux et des blocs de maçonnerie, il existe des normes autoportantes qui précisent les performances du produit à atteindre, ce qui donne un degré de liberté plus important sur le béton utilisé.

La prescription des bétons s'appuie également sur un corpus de guides techniques. Pour l'approche performantielle, on citera :

- maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton. Application de l'approche performantielle (mars 2010) - Recommandations provisoires LCPC ;
- méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons (mars 2009) - Guide FNTP/FFB/CERIB/FIB.

1.2 Qu'est-ce qu'un béton bas carbone ?

La notion de béton « bas carbone » ou de béton « ultra-bas carbone » est utilisée largement mais ne fait pas l'objet d'une définition officielle s'appuyant sur un cadre normatif ou réglementaire. La méthodologie permettant d'évaluer une réduction des Émissions de Gaz à Effet de Serre (Eges) pour les bétons n'est pas encore établie de manière consensuelle.

Néanmoins, on peut considérer que les termes « béton bas carbone » doivent correspondre à un béton qui, pour des performances équivalentes à celles d'un béton de référence, génère des Eges inférieures à celles de ce béton de référence. Il n'y a pas de règles communes sur la formulation du béton de référence, il peut s'agir d'une formulation à base de CEM I ou d'une formulation plus fréquemment utilisée aujourd'hui dans le bâtiment, basée sur l'utilisation de CEM II/A-LL 42,5.

À noter que la comparaison de l'empreinte carbone de différents bétons ne peut se faire que pour le même service rendu (la même unité fonctionnelle) : performances équivalentes (performances aux jeunes âges, performances mécaniques, durabilité et résistance aux conditions agressives, ...) et même durée d'utilisation. La comparaison directe entre deux bétons n'est donc pas toujours judicieuse et a fortiori entre un béton et un autre matériau. Le cas échéant, il faut préférer la comparaison des différentes solutions constructives pour lesquelles le béton remplira une ou plusieurs fonctions.

Le calcul des Eges exprimées en kg eq.CO₂ est codifié dans la norme NF EN 15 804+A2 qui permet de déterminer l'impact environnemental d'un produit de construction, complété par la norme NF EN 16 757 régissant la catégorie de produits pour le béton et les éléments en béton. La révision de cette norme vise à intégrer les évolutions liées à la méthodologie harmonisée de la Commission Européenne pour évaluer l'empreinte environnementale des produits (PEF : Product Environmental Footprint). Cette méthodologie est basée sur les séries de standards ISO 14 040 (Analyse du Cycle de Vie) et ISO 14 020 (Déclaration environnementale).

1.2.1 Empreinte carbone d'un béton

La figure suivante détaille à titre d'exemple la répartition des Eges pour un mètre cube de béton (hors armatures) destiné à servir de poutre intérieure, d'une durée de vie de 100 ans, supportant les charges et autres éléments de planchers pour le bâtiment considéré (source base INIES¹). Ce béton est conforme à la norme NF EN206/CN et les moyens d'acheminement en matériaux sont traditionnels. La distance entre la centrale et le chantier est de 18,5 km.

L'empreinte carbone de ce béton est de 188,05 kg eq.CO₂ /m³ provenant essentiellement de l'étape de production du béton et plus particulièrement de la production du ciment. La contribution des étapes de mise en œuvre (comprenant le transport du béton jusqu'au chantier) et de fin de vie est minoritaire. La carbonatation naturelle du béton lors de sa vie en œuvre apporte une contribution négative calculée selon la méthode définie dans la norme NF EN 16 757. Dans un béton non armé traditionnel, la contribution majoritaire provient donc de la production du liant, c'est donc le levier principal pour réduire l'empreinte carbone d'un béton (non armé).

1. Base INIES : <https://www.inies.fr/accueil/>



Source : Betie (INIES)

À noter que les bétons armés contiennent des armatures dont l'impact carbone est également à considérer. La densité d'armatures sera ajustée en fonction des performances mécaniques attendues du béton.

À titre informatif, l'empreinte carbone des armatures façonnées serait comprise entre 0,8 et 2,5 kg eq. CO₂ selon le type d'armature, le mode de production et le type de mix énergétique utilisé. Avec un dosage en armature variant de 15 à 150 kg d'acier/m³ de béton selon les applications, la part des armatures dans l'empreinte carbone d'un béton armé est donc loin d'être négligeable. Par exemple, pour un béton armé à 150 kg d'acier/m³ et une empreinte carbone de 1,26 kg eq. CO₂ par kilo d'armature, le poids carbone des armatures est de 189 kg eq. CO₂/m³ de béton armé (source : Worldsteel 2008).

1.2.2 Les différents leviers de réduction de l'empreinte carbone d'un béton

1.2.2.1. Diminuer la proportion de clinker de la phase liante

L'empreinte carbone d'un béton est très dépendante de la proportion de clinker de la partie liante qui peut être réduite de deux façons :

- en optimisant le choix du ciment avec le recours à des

ciments à basse teneur en clinker (cf. encadré page suivante sur l'évolution de la norme ciment) ;

- en utilisant des additions (calcaire, laitier haut fourneau, cendres volantes, pouzzolanes ou encore argiles calcinées) en substitution d'une partie du ciment, l'empreinte carbone de ces additions étant plus faible que celle du clinker (cf. encadré page suivante sur allocation du laitier).

L'utilisation d'additions peut se faire dans le cadre de la norme NF EN 206/CN ou plus largement en utilisant l'approche performantielle. Cette dernière est partiellement encadrée par le fascicule 65 du CCTG Travaux de 2017 (Exécution des ouvrages de génie civil en béton) et par certains guides professionnels cités au paragraphe 1.1.

Il faut noter que ces optimisations doivent tenir compte :

- des conditions de mise en œuvre : rhéologie/maniabilité du béton, périodes hivernales, résistances mécaniques au jeune âge minimales pour certaines parties d'ouvrage, dispositifs et durée de la cure ;
- des exigences relatives à la qualité du parement ;
- de la disponibilité locale des liants et additions utilisés.

	CEM I	CEM II A-L	CEM III/A	CEM III/A PM-ES	CEM III-B	CEM V/A
Clinker [K]	95 - 100 %	80 - 94 %	35 - 64 %	35 - 40 %	20 - 34 %	40 - 64 %
Laitier [S]			36-65 %	60-65 %	66 - 80 %	18 - 30 %
CV [V]						18 - 30 %
Calcaire [LL]		6 - 20 %				
Constituants secondaires	0 - 5 %	0 - 5 %	0 - 5 %	0 - 5 %	0 - 5 %	0 - 5 %
Émission CO ₂ [kg CO ₂ eq/t]	765	676	464	319	274	468

Données ATIHL 2021. <https://www.infociments.fr/ciments/ciments-declaration-environnementale-inventaire-analyse-du-cycle-de-vie>.

ÉVOLUTION DE LA NORME CIMENT NF EN 197-1 ET NF EN 197-5

Deux nouveaux ciments à basse empreinte carbone sont venus récemment compléter la gamme des ciments courants (NF EN 197-5 - mai 2021) :

- les ciments CEM II/C-M (M pour mélange) et les CEM VI. Ce sont des ciments dits « ternaires » composés de clinker, de composés cimentaires (laitiers, cendres ou pouzzolane) et de calcaire. Les teneurs en clinkers varient de 50 à 65 % pour les CEMII/C-M et de 35 à 50 % pour les CEM VI ;
- les ciments LC3 (Limestone Calcinated Clay Cement), composés de clinker, calcaire et argile calcinée (métakaolin). Ils présentent une résistance mécanique supérieure à celle des ciments traditionnels et ont une empreinte environnementale réduite de 35 à 40 %.

ALLOCATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES LAITIERS : COMITÉ D'EXPERTS

Les laitiers de haut-fourneau utilisés comme constituants secondaires de certains ciments (NF EN 197-1) ou comme addition de type II (NF EN 15 167-1) dans les bétons sont des coproduits de la fabrication de la fonte dans un haut-fourneau. Le principe de l'allocation consiste à répartir les impacts environnementaux d'un processus entre les différents produits ou coproduits issus de ce processus. Il existe différentes méthodes d'allocation : allocation massique, volumique, économique... Pour les produits de construction, celles-ci sont établies par la norme NF EN 15 804.

Actuellement, les laitiers de haut-fourneau sont non alloués d'impacts pour leur production et sont considérés comme des déchets lorsqu'intégrés au ciment pour produire du béton. De plus, certaines données environnementales d'acier attribuent des crédits à ces coproduits (laitiers de haut-fourneau) qui seront utilisés en substitution des matières premières ou ressources énergétiques. Il en résulte donc une incomplétude de prise en compte des impacts environnementaux entre les deux filières pour ce coproduit.

Après avoir pris connaissance de ces problèmes d'allocation, le ministère au travers de la Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages (DHUP) a créé un groupe d'experts dont l'objectif est de définir une méthode et une valeur d'allocation pour le laitier de haut-fourneau. Ce groupe de travail pourrait faire évoluer l'empreinte carbone du laitier de haut-fourneau et des bétons bas carbone qui font appel à ce coproduit. En lien avec la loi Antigaspillage et Économie Circulaire, la DHUP souhaite promouvoir les processus vertueux de ces coproduits visant à réduire les émissions globales de CO₂.

1.2.2.2. Utiliser de nouveaux liants

Depuis plus de 20 ans, de nombreux travaux de recherche et développement sont menés pour le développement de nouveaux liants, i.e. des liants dont la composition minéralogique et les principes de réactivité sont différents de ceux des ciments Portland utilisés classiquement et dont l'empreinte carbone est plus faible.

Pour certains d'entre eux, la commercialisation débute mais leur développement est encore freiné par une absence de contexte normatif permettant d'encadrer les usages. Le paragraphe 1.3.4 présente succinctement les diverses voies explorées et leur stade de développement.

Les données d'impact environnemental sont disponibles pour certains de ces produits mais les comparaisons avec les bétons traditionnels doivent être faites à l'échelle de la solution constructive ou du béton, pour un même service rendu. En effet, la comparaison des données d'impact environnemental à l'échelle des liants peut conduire à des erreurs de jugement et des conclusions erronées.

Il convient également d'intégrer dans l'analyse la disponibilité locale des produits et le cas échéant les impacts des transports induits pour la fourniture de ces nouveaux liants.

1.2.2.3. La captation et stockage du CO₂

Un des leviers pour réduire l'impact des ciments et donc des bétons est de capter le CO₂ en sortie du procédé cimentier. Il s'agit de recherches de solutions à moyen et long terme mais qui sont source d'espoir pour la profession. D'importantes recherches ont été entreprises pour optimiser les techniques de capture et de stockage du CO₂:

- concentrer le flux de CO₂ dans le flux gazeux pour en faire du carbone (Cleanker);
- capturer le CO₂ de manière plus efficace et rentable (Catch4climate);
- stockage du CO₂ dans des formations géologiques (usine de Brevik en Norvège);
- captage du CO₂ par des granulats de bétons recyclés (FastCarb - voir ci-dessous);
- utilisation du CO₂ capté pour créer de nouveaux produits tels que du carburant d'aviation neutre en carbone (WestKuste 100) ou faire croître de la biomasse (Cimentalgue).

Une start-up américaine a développé un liant non hydraulique, dont le durcissement se fait par carbonatation sous injection de CO₂.

La production de ce liant nécessite moins de calcaire que pour un ciment Portland traditionnel et une température de cuisson inférieure, ce qui permet de réduire les Eges pour la phase de production de 20 à 30 %. Le processus de durcissement par carbonatation peut capturer jusqu'à 300 kg de CO₂ par tonne de ciment.

La solution est développée en France et vise, dans un premier temps, à produire des pièces de petite taille comme des pavés à usage extérieur ou des dalles d'aménagement.

1.2.2.4. Autres

Les solutions qui visent à introduire des granulats recyclés comme les travaux du projet national Recybéton (voir encadré page suivante) peuvent avoir un impact bénéfique sur la réduction des épuisements des ressources naturelles à l'échelle locale. En revanche, elles n'apportent pas de réduction notable des Eges. Il faut d'ailleurs veiller à ce que ces pratiques ne s'accompagnent pas d'un surdosage en ciment qui serait contre-productif d'un point de vue impact carbone.



PROJET FASTCARB [CARBONATATION ACCÉLÉRÉE DE GRANULATS DE BÉTON RECYCLÉ]

FastCarb (2017-2020) est un projet national de recherche et développement collaboratif qui rassemble des organismes publics et privés issus de la communauté béton (maîtres d'ouvrage, ingénieries, entreprises de travaux, bureaux de contrôle, industriels, organismes de recherche).

Les granulats de béton recyclé (GBR) présentent une plus grande porosité que les granulats naturels, ce qui peut avoir un impact sur les propriétés des bétons de granulats recyclés. Le Projet National FastCarb vise à stocker de manière accélérée le CO₂ par carbonatation de certaines phases minérales constitutives des bétons. Ce phénomène permet également d'améliorer la qualité des GBR par colmatage de la porosité tout en diminuant l'impact carbone du béton dans les structures.

La première partie du projet a pour objectif de valider, sur les plans théorique et expérimental, la preuve de concept technique de carbonatation accélérée des GBR. La seconde partie vise à concevoir et mettre en œuvre un procédé de carbonatation accélérée à l'échelle préindustrielle et de caractériser sa viabilité économique et environnementale.

PROJET NATIONAL RECYBETON

Le Projet National RECYBETON (2012 – 2018) visait à favoriser l'utilisation de matériaux issus des bétons de déconstruction comme constituants des nouveaux bétons ou comme matière première pour la production de liants hydrauliques. L'objectif du projet était de montrer comment et à quelles conditions il était possible d'utiliser ces produits pour fabriquer du béton, avec des performances techniques, économiques et environnementales satisfaisantes.

Les études menées sur trois thématiques (les procédés et technologies, le comportement des matériaux et des structures, l'impact environnemental) ont comporté des travaux de laboratoire et de modélisation ainsi que la réalisation de chantiers expérimentaux.

RECYBETON a permis de démontrer qu'il était possible d'utiliser plus de granulats recyclés et de bétons recyclés que les normes actuelles ne l'autorisent. Un ouvrage de synthèse, résumant les acquis scientifiques du projet, un guide pratique à destination des professionnels ainsi qu'un recueil de proposition d'évolutions normatives et réglementaires ont été publiés². Les résultats de ces travaux vont entraîner une évolution des normes afin d'optimiser l'utilisation des granulats de bétons recyclés dans les bétons.

1.2.3 Les données d'impact environnemental

Les données d'impact environnemental des produits de construction, dont les Eges, sont régies par la norme NF EN 15 084+A2 qui permet de déterminer l'impact environnemental d'un produit de construction, complétée par la norme NF EN 16 757 qui établit les règles régissant la catégorie de produits pour le béton et les éléments en béton. L'application de ces normes conduit, pour chaque produit, à la réalisation d'une Déclaration Environnementale de Produit (DEP) en France, gérée dans la base INIES (sous forme de FDES, « Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire ») accessible librement³ et à l'international sous forme d'EPD pour « Environmental Product Declaration », accessible sur le site de « The International EPD® System »⁴. Cette déclaration environnementale est faite sur la base du volontariat et tous les produits de construction ne font pas encore l'objet d'une déclaration environnementale.

Pour le béton prêt à l'emploi, certaines fiches sont disponibles sur la base INIES, mais il est également possible de créer une fiche par le biais du configurateur BETie « Béton et impacts environnementaux » créé, en 2011 par le Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi (SNBPE). Cet outil de calcul des impacts environnementaux des bétons prêts à l'emploi permet la création de FDES sur mesure dans le cadre d'un projet spécifique. L'outil répond aujourd'hui aux exigences les plus récentes des normes NF EN 15 084+A2 et NF EN 15 804/CN. De plus, BETie a été vérifié par un organisme de certification agréé par l'AFNOR.

De même, les FDES collectives établies sur la base des unités fonctionnelles les plus représentatives des solutions constructives préfabriquées en béton sont disponibles sur la base INIES. Le Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB) a développé un configurateur de FDES, Environnement IB, qui permet leur ajustement aux projets pour les familles de produits suivants : Murs à Coffrage Intégré (MCI), prédalles en béton armé et précontraint, dalles alvéolées, poteaux en béton armé et poutres en béton précontraint ; gamme qui devrait être élargie aux murs isolés et architecturaux. Conçu pour permettre une prise en main par les bureaux d'études en charge des évaluations environnementales de bâtiments, il permet de produire des FDES de produits configurés au format PDF respectant la norme NF EN 15 804+A1 et son complément national NF EN 15 804/CN, des fichiers Excel reprenant les indicateurs environnementaux par étapes du cycle de vie ainsi que des fichiers XML standardisés pour importer les résultats des configurations dans les logiciels d'ACV bâtiment agréés. Le configurateur a fait l'objet d'une vérification par un vérificateur de FDES habilité par le programme INIES.

D'autres données peuvent être extraites de bases de données internationales commeecoinvent mais pour lesquelles l'accès nécessite une licence. Ces données ne sont pas toujours en adéquation avec le contexte français et doivent être utilisées avec prudence.

2. - Recommandations du projet national RECYBETON « Comment recycler le béton dans le béton », novembre 2018.

- Le béton recyclé, sous la direction de François De Larrard et Horacio Colina, aux éditions de l'IIFSTTAR, 2018.

- Projet National RECYBETON, Propositions d'évolutions normatives, avril 2019.

3. <https://www.inies.fr/accueil/>

4. <https://www.environdec.com/>

1.3 Les différentes catégories de bétons bas carbone

1.3.1 Optimisation des émissions de GES pour des bétons conformes au référentiel NF EN 206/CN actuel

1.3.1.1. Les bétons formulés à base de ciment couvrant la NF EN 197-1

Les producteurs de béton prêt à l'emploi, les entreprises de construction et les fabricants de produits préfabriqués structuraux proposent des bétons bas carbone conformes à la norme NF EN206/CN en optimisant la teneur en clinker par le biais du choix du liant ou l'utilisation des additions et en optimisant les distances transportées en amont de la centrale béton. Les réductions des Eges affichées sont de l'ordre de 20 à 40 %, voire davantage, par rapport à une référence formulée au CEM I⁵. Les optimisations peuvent passer également par une réduction des rapports E/C et l'utilisation d'une adjuvantation adaptée.

Ces bétons peuvent être des bétons d'ingénierie au sens de la norme NF EN 206/CN.

La profession du béton a publié en 2017 dans la collection « Solutions béton », un document intitulé « Bétons et empreinte carbone des bâtiments, guide de recommandations et d'aide à la prescription à l'attention des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre ». Il présente l'empreinte carbone des bétons en fonction de la classe de résistance et pour les principales expositions courantes.

Étant conformes à la norme, ces bétons ne donnent pas lieu à de réserve particulière concernant leur durabilité. En revanche, ils peuvent conduire à certaines précautions d'usage, notamment par temps froid, et faire évoluer les pratiques de chantier : durée de cure allongée, développement des résistances au jeune âge plus lent.

5. Attention pour les bétons prêts à l'emploi, la solution de base est souvent un CEM II/A avec une réduction par conséquent moins importante

1.3.1.2. Les ciments sursulfatés

La norme NF EN 206/CN autorise également l'utilisation de ciments sursulfatés dont les spécifications sont encadrées par la NF EN 15 743. Ce sont des liants constitués principalement de laitier granulé broyé de haut-fourneau et de sulfate de calcium. Le développement des résistances mécaniques des bétons formulés à partir de ces liants est relativement lent ce qui restreint leur emploi dans le bâtiment actuellement en raison des cadences de décoffrage élevées recherchées. Les ciments sursulfatés peuvent être utilisés pour les bétons de fondation ou destinés à des structures massives.

Les Eges liées à la fabrication des ciments sursulfatés sont réduites du fait de leur teneur nulle ou très faible en clinker.

1.3.2 Bétons bas carbone validés par une approche performantielle

La norme NF EN 206/CN introduit la notion d'approche performantielle dans les articles 5.2.5.3 et 5.3.3 qui permet de sortir de l'approche prescriptive (tableaux NAF1 et NAF2). Les travaux menés par le Projet National Perfdub⁶ devraient permettre d'explicitier davantage l'approche performantielle dans la norme NF EN 206/CN.

Cette approche est basée sur une démarche globale et prédictive de la durabilité des bétons fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité associés à des critères performantiels et des valeurs seuils à respecter. Elle permet d'établir la conformité de la composition d'un béton s'écartant des valeurs prescriptives. Cette approche est applicable pour toutes les classes d'exposition et s'appuie sur des essais pour lesquels on dispose de modes opératoires robustes.

6. <https://www.perfdub.fr/>



Le fascicule 65 « Exécution des ouvrages de génie civil en béton », encadre cette approche pour les classes d'exposition XC, XD, XS, XF et les risques de gonflement interne et établit les méthodes à suivre.

Cette approche permet une optimisation plus poussée de la teneur en ciment d'un béton que l'approche prescriptive de la norme NF EN 206/CN (2014). Elle nécessite beaucoup d'anticipation et la réalisation d'un programme d'essais complet.

Elle est utilisée pour réduire les Eges par les producteurs de BPE, les entreprises de construction et les usines de préfabrication.

Des progrès importants ont été faits ces quinze dernières années sur la caractérisation des bétons vis-à-vis de la durabilité avec le développement des indicateurs de durabilité et des essais associés. Ces progrès se poursuivent actuellement au travers du Projet National Perfdub. L'ensemble de ces travaux permettent d'apporter des réponses aux contraintes techniques et environnementales par des formules bétons plus ciblées en termes de durabilité.

Domaines d'application

Ces bétons formulés à partir de constituants traditionnels sont très proches des bétons d'ingénierie autorisés par la norme et les domaines d'emploi sont sensiblement équivalents, autant pour les bétons prêts à l'emploi que pour les bétons préfabriqués.

1.3.3 Bétons obtenus par activation des laitiers de haut-fourneau

Le laitier de haut-fourneau est un coproduit de la fabrication de la fonte, issu de la gangue minérale du minerai fondu. Pour présenter une certaine réactivité, ce laitier doit être vitrifié et broyé.

Le principe de l'activation des laitiers de haut-fourneau est relativement ancien (années 1930-1940). Depuis, de très nombreux travaux ont permis d'établir une bonne connaissance de ces matériaux. Les laitiers activés ont beaucoup été utilisés dans la période d'après-guerre par les pays de l'Union Soviétique et la Chine pour différents ouvrages et sont largement normalisés dans ces pays. Depuis quelques années, l'intérêt s'est accru pour les laitiers dans l'optique de réduire l'impact environnemental des bétons ou autres produits de construction.

Le laitier de haut-fourneau possède une hydraulicité latente qui demande à être activée. Cette activation chimique peut être calcique, alcaline et/ou sulfatique. Une activation thermique peut être associée dans certains cas.

C'est un produit normalisé comme une addition béton de type II (NF EN 15 167-1). Les caractéristiques des laitiers granulés de haut-fourneau moulus sont encadrées par la norme NF EN 15 167-1 de septembre 2006.

Les travaux de ces dernières années ont consisté à améliorer la compréhension des réactions lors de l'activation et l'influence de la nature du laitier, du dosage et de la nature des activateurs et des conditions d'hydratation sur le développement des résistances et les caractéristiques aux jeunes âges.

Certaines formules de bétons activés permettent d'obtenir des performances mécaniques analogues à celles d'un ciment Portland. Des avancées ont également été faites quant aux développements des résistances mécaniques aux jeunes âges.

Domaine d'application

Ce type de liant est destiné à la préfabrication en usine et au béton prêt à l'emploi. Actuellement, différentes entreprises présentent une offre commerciale de béton de laitier activé. Certains de ces produits font l'objet d'une ETPM⁷ (Évaluation Technique de Produits ou de Matériaux). En revanche, il n'existe pas en date de ce rapport d'avis technique couvrant ce type de matériau. Des ATEX (Appréciation Technique d'Expérimentation) de cas B (pour des opérations particulières) ont par contre déjà été formulées et constituent les premières références.

1.3.4 Bétons bas carbone émergents

Dans ce paragraphe sont présentés des ciments et des liants associés à certains procédés qui peuvent être des solutions pour la fabrication de bétons ou produits de construction bas carbone. Ce sont des technologies plus ou moins émergentes, certaines correspondent à des produits commercialisés et bénéficiant d'Évaluations Techniques Européennes (ETE)⁸, mais la mise en œuvre de ces bétons formulés à partir de ces liants n'est pas considérée actuellement comme faisant partie des techniques courantes.

7. Cette ETPM du fait qu'elle ne vise qu'à déterminer des caractéristiques intrinsèques d'un produit ou d'un matériau, n'a pas de valeur d'Avis Technique au sens de l'arrêté modifié du 21 mars 2012. Elle ne dispense pas de vérifier l'aptitude du produit ou matériau à être incorporé dans un ouvrage déterminé, par consultation de documents de référence de l'application considérée (NF-DTU, Avis Techniques, ...).

8. Une Évaluation Technique Européenne (ETE) fait suite à une démarche volontaire. Elle est nécessaire pour établir une déclaration de performance et apposer le marquage CE sur un produit non couvert ou non totalement couvert par une norme européenne harmonisée mais n'a pas valeur d'Avis Technique au sens de l'arrêté modifié du 21 mars 2012.

1.3.4.1. Les ciments sulfo-alumineux

Les ciments sulfo-alumineux, développés en Chine dans les années 1970, sont des liants hydrauliques dont le composant principal est un sulfoaluminate de calcium, la ye'elimite noté C_4A_3 . Cette phase minérale peut être associée à d'autres comme l'alite (C_3S), la bélite (C_2S) ou un sulfosilicate de calcium et un sulfate de calcium formant ainsi plusieurs types de liants au sein de cette famille des ciments sulfo-alumineux. Le ciment sulfo-alumineux bélitique constitué de ye'elimite, de belite et de sulfate de calcium est l'un des plus connus et utilisés. Il est depuis quelques années produit et commercialisé en France.

Les Eges liées à la production d'un clinker sulfo-alumineux sont inférieures à celles d'un clinker Portland du fait :

- d'une consommation d'énergie plus faible :
 - la température de clinkérisation est de 1 250 °C à 1 350 °C contre 1 450 °C pour les ciments Portland,
 - contrairement au clinker d'un ciment Portland, le clinker sulfo-alumineux est plutôt poreux et friable ce qui conduit à des énergies de broyage inférieures ;
- d'une proportion de calcaire dans le cru inférieur à celle nécessaire pour les ciments Portland, entraînant une réduction des émissions du CO_2 lors de la décarbonatation.

Les principaux produits d'hydratation d'un ciment sulfo-alumineux sont l'ettringite et les C-S-H. Ils sont caractérisés par un durcissement rapide, le développement de résistances très élevées aux jeunes âges et un très faible retrait. Les vitesses de prises peuvent être contrôlées de quelques secondes à plusieurs heures. La composition

minéralogique de ce type de liant confère aux bétons une très bonne résistance aux sulfates et aux environnements agressifs en général. Ces liants sont caractérisés par un pH inférieur à celui des ciments Portland (de l'ordre de 11 à 11,5). La résistance à la corrosion des aciers dans ces bétons est le sujet de travaux de recherche pour améliorer la compréhension des mécanismes mis en jeu.

Il est également possible de reconstituer une matrice de liant ettringitique par voie alcaline sans clinker sulfoalumineux.

Domaines d'application

En Chine, les ciments sulfo-alumineux sont normalisés depuis 1981 et utilisés pour différentes applications : béton structurel, béton précontraint, préfabrication.

En Europe et notamment en France, différentes gammes de ciments sulfo-alumineux sont produites ou en cours de développement par les cimentiers. Il n'existe pas encore de cadre normatif européen ou français pour ce type de ciment, notamment pour des usages structurels, les applications les plus courantes jusqu'à présent exploitant sa capacité à développer de fortes résistances à court terme (mortier et coulis de scellement ou de réparation, mortiers colles, chapes fluides, dallages industriels...). À noter qu'un producteur français a obtenu récemment une évaluation technique européenne (ETE) pour un ciment sulfo-alumineux destiné aux applications de structure.



PROJET ECO-BINDER

Eco-binder est un projet financé par le programme européen de recherche et d'innovation Horizon 2020 qui a pour objectif de développer les applications pour l'enveloppe des bâtiments à partir des liants hydrauliques à faible impact CO_2 . À travers la mise en place de démonstrateurs sous différentes conditions climatiques, le projet doit démontrer la possibilité de substituer les ciments sulfo-alumineux bélitiques à l'utilisation du ciment Portland traditionnel dans les produits béton. Les travaux de recherche menés dans le cadre du projet Eco-binder vont contribuer à une meilleure connaissance du comportement des bétons à base de ciments sulfo-alumineux bélitiques et de leur durabilité. Ces retours d'expériences seront mis à profit pour établir une base à la future normalisation de ces produits. Le consortium comprend 14 partenaires européens dont les cimentiers Lafarge et Vicat.

1.3.4.2. Les géopolymères

On appelle géopolymère le produit de la réaction entre une poudre d'aluminosilicate et une solution alcaline. Ce terme a été introduit par Davidovits dans les années 70. La structure du matériau ainsi produit est particulière et décrite comme une structure tridimensionnelle analogue à celle des polymères organiques, d'où la dénomination de « géopolymère ». Ce sont des matériaux amorphes (non cristallisés) considérés comme stables et qui développent de fortes résistances mécaniques. Il s'agit d'une grande famille dont la composition et les propriétés vont varier en fonction du rapport Al/Si et du type d'aluminosilicate et d'alcalin utilisés.

Dans les applications en tant que matériaux de construction, il s'agit généralement d'une cendre volante, d'un métakaolin ou d'argiles calcinées activées par de la soude, de l'hydroxyde de potassium, de la chaux, du carbonate de sodium ou un silicate de sodium.

Les matériaux géopolymères sont présentés comme très résistants aux attaques acides et aux températures élevées mais sensibles au retrait. La maîtrise de la rhéologie des bétons de géopolymères est délicate et l'ajustement du E/L déterminant dans le développement des performances mécaniques et la maîtrise des indicateurs de durabilité (perméabilité et porosité). Les formules de béton de géopolymères sont peu robustes et nécessitent une bonne maîtrise de la variabilité de la qualité des constituants et de leur proportion. Les conditions de fabrication, de transport et de mise en œuvre doivent être scrupuleusement respectées.

Le caractère corrosif des produits d'activation peut induire des contraintes d'utilisation à l'échelle industrielle relative à la manipulation des produits.

Domaines d'application

Les géopolymères ne font pas l'objet d'un cadre normatif européen ou français. Les domaines d'emploi actuels sont des mortiers colles, joints de carrelage, mortiers de réparation, préparations pour le traitement et l'inertage des déchets.

Il existe une première expérience de l'emploi de béton de géopolymère pour un ouvrage structurel réalisé en Australie. En 2010, la Direction de l'Équipement de l'État de Victoria a également introduit la possibilité d'utiliser un béton de géopolymère pour le revêtement en béton des routes.

1.3.4.3. Autres liants émergents

De nombreux travaux de recherche et développement ont fait émerger d'autres types de liants n'ayant pas recours à l'utilisation d'un clinker et dont l'empreinte carbone serait réduite. On peut notamment citer les liants à base d'oxyde de magnésium et les liants d'hydrosilicate de calcium.

2. RECOMMANDATIONS ET POINTS DE VIGILANCE

2.1 Au stade de la conception

L'empreinte carbone d'un béton ne doit pas être dissociée de ses performances et de sa fonctionnalité, et notamment de :

- ses performances mécaniques ;
- son comportement au jeune âge (maniabilité/rhéologie, développement des résistances) ;
- son comportement au feu ;
- sa durabilité et résistance aux environnements agressifs ;
- ses propriétés thermiques ;
- ses caractéristiques esthétiques ;
- ...

Le choix d'une solution béton bas carbone doit s'inscrire dans une réduction de l'empreinte carbone à l'échelle du bâtiment ou d'une solution constructive. Pour être pertinente, la solution béton bas carbone doit s'intégrer dans une optimisation du dimensionnement de la structure et une rationalisation de l'utilisation des ressources matériaux corps d'état par corps d'état.

Ainsi, la réflexion sur les solutions bétons bas carbone doit être entamée dès la conception et rester conjointe du choix des méthodes constructives. La prise en compte du sujet très en amont favorise les optimisations et permet de conduire au meilleur compromis performances/empreinte carbone pour une solution constructive donnée.

2.2 Spécification des bétons

Il convient de détailler les besoins de bétons par partie d'ouvrage en prenant en compte, outre les classes de résistance, les contraintes liées aux classes d'exposition, aux méthodes constructives (mise en œuvre, cadence de décoffrage...) ainsi qu'aux exigences non structurales (thermiques, résistance au feu, esthétiques, ...).

Les bétons bas carbone font appel, pour certains d'entre eux, à des constituants qui ne sont pas toujours disponibles localement. Il est important pour la performance environnementale globale du bâtiment d'asseoir les solutions bétons retenues dans un cadre local.

Enfin, comme vu dans le chapitre précédent, les termes bétons bas carbone recouvrent actuellement une grande variété de bétons qui ne conduisent pas aux mêmes exigences, règles d'usage et ne font pas tous partie des techniques courantes au sens des contrats d'assurance de Responsabilité Civile Décennale (RCD)⁸. Les documents contractuels et techniques doivent en tenir compte et être adaptés si besoin.

Les cahiers des charges doivent notamment intégrer que les bétons bas carbone sont issus d'optimisations et présentent une technicité plus poussée que les bétons traditionnels, pouvant leur conférer une robustesse moindre. Une attention particulière doit donc être portée au suivi de la conformité des produits et à l'application des règles d'exécution.

La spécification des bétons doit être effectuée selon leurs normes respectives :

- norme NF EN 206/CN pour les bétons de structure mis en place sur site ou utilisés dans les produits préfabriqués structuraux (via leurs normes produit) ;
- normes auto-portantes pour les produits préfabriqués non structuraux.

■ Pour les bétons relevant de la norme NF EN206/CN

Il peut s'agir de bétons d'ingénierie dont le travail de formulation doit être anticipé (adaptation des bétons aux contraintes et exigences du chantier tout en optimisant l'impact carbone). La norme NF EN206/CN prévoit la réalisation d'une étude préliminaire et la mise en place d'un contrôle de production spécifique qu'il convient de respecter.

■ Pour les bétons ne relevant pas de la norme NF EN206/CN

- Lorsqu'une approche performantielle est choisie pour valider des formulations bétons et justifier que leurs performances sont en accord avec les besoins, le sujet doit être anticipé par l'entreprise et le maître d'œuvre afin d'une part, que les différentes parties s'accordent sur la méthodologie à mettre en œuvre et les critères de conformité à respecter, et d'autre part, que le temps nécessaire à la réalisation des essais en laboratoire soit suffisant. À la date du présent rapport, une démarche est en cours pour introduire explicitement l'approche performantielle dans la norme NF EN 206/CN. En attendant, les méthodologies proposées pourront s'appuyer sur les avancées en la matière pour les ouvrages de génie civil au travers du fascicule 65 et des guides professionnels évoqués au paragraphe 1.3.2.

8. www.qualiteconstruction.com/aqc/nos-missions/pole-prevention-produits/

Il convient également, dès le stade de la spécification, de définir le niveau de contrôle souhaité et les critères de conformité associés. En effet, un contrôle renforcé peut être nécessaire, il doit s'intéresser aux caractéristiques des constituants du béton, du béton frais et durci mais également aux étapes de fabrication, de mise en œuvre et de cure.

- Dans le cas des bétons formulés à partir de liants non traditionnels, il convient d'établir clairement le cadre de prescription et les limites d'usage. Comme pour les autres bétons, il convient également de définir les exigences relatives aux études préliminaires et aux niveaux de contrôle à mettre en place.

Pour les bétons de structure, une étude spécifique s'appuyant sur des essais en laboratoire est nécessaire pour caractériser les lois de comportement de ces bétons et faire la démonstration que les règles de calcul de l'Eurocode 2 restent applicables, ou apporter les corrections nécessaires. Une attention particulière devra être portée au respect des règles parasismiques et de tenue au feu le cas échéant. De la même façon, une étude spécifique devra démontrer la durabilité des bétons et la maîtrise des mécanismes physico-chimiques mis en jeu. L'approche performantielle basée sur des indicateurs de durabilité devra être complétée d'essais long terme permettant d'étudier les matériaux dans les conditions d'agressivité auxquelles ils sont soumis et la compatibilité entre les différents constituants. Ce sont des études longues et coûteuses.

2.3 Au stade fabrication et mise en œuvre

■ Pour les bétons conformes à la norme ou formulés à partir de constituants traditionnels

Les retours d'expérience mettent en évidence que l'étape de fabrication ne présente pas de spécificités. Pour les bétons prêts à l'emploi, contenant très peu de clinker, il peut être pertinent que les centrales soient équipées de chaudières pour faciliter leur usage en période hivernale.

À noter que la recherche d'une optimisation des Eges des bétons peut conduire à des prescriptions plus fines et de fait à une multiplication des formules impliquant un suivi renforcé en phase chantier. À noter que le recours à un plus grand nombre de formules béton pour un chantier peut entraîner une augmentation du flux de camions.

Dans certains cas, pour lesquels le E/C est relativement faible, la maîtrise de la rhéologie peut s'avérer plus compliquée que pour un béton traditionnel et les prescriptions relatives à la mise en œuvre doivent être scrupuleusement respectées.



De par leur faible teneur en clinker, la prise et le développement des résistances mécaniques peuvent être plus lents, entraînant :

- des impacts sur les cadences (un allongement des cycles de décoffrage peut être nécessaire) ;
- la nécessité d'une cure plus poussée que les pratiques traditionnelles ou l'application d'un produit de cure ;
- une sensibilité à la fissuration due au retrait ;
- des précautions d'usage en hiver.

Les retours d'expérience mettent en évidence qu'une attention particulière doit être portée aux conditions de cure et à sa durée, les cycles de coffrage/décoffrage devant être adaptés si besoin.

La qualité des parements est également sensible au respect d'une cure suffisante. Bien conduite, celle-ci permet de maîtriser la fissuration due au retrait.

La prescription des bétons bas carbone étant plus fine, les plans de contrôle doivent être respectés scrupuleusement.

Compte tenu de la vigilance à apporter lors de la mise en œuvre et de la cure de ces bétons, il apparaît important que les opérateurs et les conducteurs de travaux soient formés aux spécificités de ces nouveaux bétons.

Pour les bétons préfabriqués, les particularités de ces bétons doivent être intégrées dès la phase de développement et le process de fabrication est adapté en usine si besoin, notamment par le biais d'une activation thermique. L'étape de mise en œuvre est identique à celle des bétons préfabriqués traditionnels.

■ Pour les bétons formulés à partir de liants non traditionnels

Il peut s'agir de bétons fabriqués à partir de laitier activé ou d'autres liants plus émergents. En ce qui concerne leur utilisation comme béton prêt à l'emploi pour le bâtiment, les retours d'expérience sont encore peu nombreux et concernent principalement l'utilisation de laitier activé.

La fabrication et la mise en œuvre de ces nouveaux bétons doivent être considérées comme expérimentales et se conformer scrupuleusement aux préconisations techniques des fournisseurs en attendant la définition d'un cadre normatif plus large ou de guides professionnels. La fabrication de ces bétons avec les outils de production existants est possible. Cependant, ces outils industriels doivent présenter une certaine flexibilité par rapport à la production courante. Les conditions de stockage des constituants sont à considérer spécifiquement et les

cycles de malaxage doivent être adaptés au cas par cas. L'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur revêt en effet une grande importance dans le résultat final, de même que les durées de malaxage qui peuvent être allongées par rapport à une production traditionnelle.

Pour les bétons préfabriqués, les process de fabrication en usine doivent être adaptés pour prendre en compte les spécificités de ces nouveaux bétons notamment par le biais d'une activation thermique appropriée. Le domaine d'usage de ces éléments préfabriqués est défini soit par le respect d'une norme produit, soit par le biais d'un Avis Technique ou d'une Appréciation Technique d'Expérimentation. La mise en œuvre sur le chantier des pièces préfabriquées ne présente a priori pas de spécificités et doit respecter les prescriptions des fournisseurs et les documents techniques de référence.

La maîtrise de la rhéologie des bétons de géopolymères est délicate et l'ajustement de la teneur en eau déterminant dans le développement des performances mécaniques et la maîtrise des indicateurs de durabilité (perméabilité et porosité). Les formules de béton de géopolymères sont encore peu robustes et nécessitent une bonne maîtrise de la variabilité de la qualité des constituants entrants et de leurs proportions. Les conditions de fabrication, de transport et de mise en œuvre doivent être scrupuleusement respectées car susceptibles d'influencer fortement les propriétés finales du béton.

2.4 Durabilité

■ Pour les bétons conformes à la norme ou formulés à partir de constituants traditionnels

La littérature scientifique et technique est abondante sur les retours d'expérience et les essais relatifs à la durabilité des bétons formulés à partir de CEM III ou de liants contenant des proportions importantes d'additions du type II et notamment de laitier de haut-fourneau. Ces additions sont d'ailleurs prescrites pour renforcer la durabilité des bétons soumis à des environnements agressifs ou pour se prémunir contre des pathologies de type réaction alcali-granulat ou réactions sulfatiques. L'alcalinité de ces bétons est suffisante pour protéger les armatures de la corrosion par application des règles de l'art actuelles.

Les bétons bas carbone conformes à la norme ne présentent pas de risques particuliers en termes de durabilité sous la condition du respect des Règles de l'art, notamment relatives à la mise en œuvre et la cure qui doivent être menées de manière appropriée.

■ Pour les bétons formulés à partir de liants non traditionnels

Comme décrit au chapitre 1, il existe une grande variété de liants non conventionnels pouvant conduire à la fabrication de béton bas carbone. Les développements en cours ne sont pas tous au même niveau et des études sont encore à mener pour encadrer les domaines d'usage de ces bétons et maîtriser les conditions de leur durabilité.

L'utilisation de ces bétons doit donc être considérée comme expérimentale et faire l'objet d'un suivi dans le temps.

Les développements concernant les laitiers activés sont les plus avancés et bénéficient des retours d'expérience les plus anciens et d'une bonne connaissance des mécanismes physico-chimiques en jeu, la littérature étant abondante sur le sujet. La matrice liante constituée est proche de celle obtenue avec des ciments au laitier, ce qui permet une avancée rapide des développements. Leur utilisation a débuté dans le bâtiment par le biais d'ATEX de cas B.

En ce qui concerne les liants émergents, les travaux de recherche en cours s'attachent à identifier les risques et à les maîtriser. Dans le cas des géopolymères, les études actuelles concernent notamment : la maîtrise du rapport liquide/solide et son influence sur les résistances mécaniques et les indicateurs de durabilité (porosité, perméabilité à l'air et à l'eau) et le maintien de la passivation des aciers.

■ Pour les bétons relevant de normes de produits préfabriqués non structurels

Dans le cas des produits en béton disposant de normes auto-portantes, la durabilité est vérifiée directement sur les produits en utilisant des essais performantiels adaptés à l'usage attendu des produits.

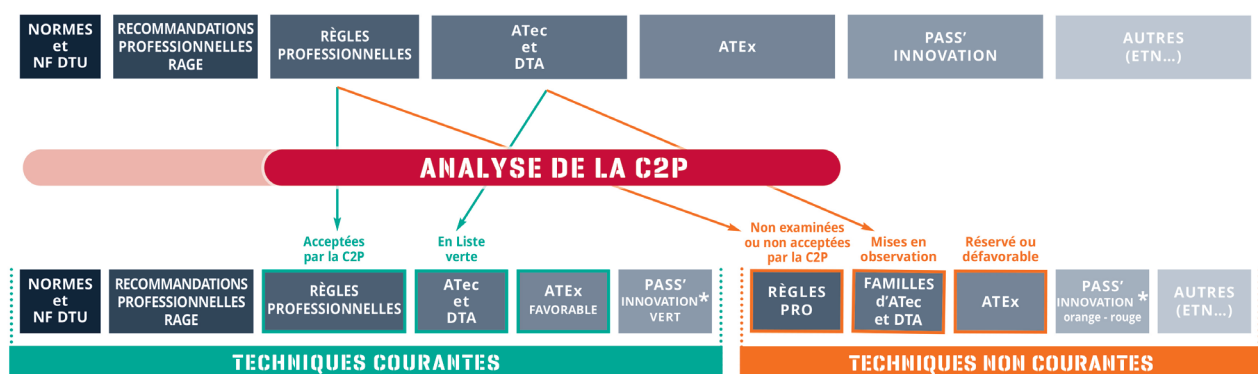
2.5 Assurabilité

La volonté d'atteindre les objectifs de réduction des Eges fixés par la RE2020 conduit les entreprises et les bureaux d'études à se tourner vers des procédés ou produits innovants. Les conditions d'assurabilité de ces produits ou procédés dépendront notamment de leur classement dans les techniques courantes ou non. Il convient de vérifier et prendre en compte cet aspect en amont.

L'utilisation des bétons bas carbone qui ne relèvent pas de la norme NF EN206/CN ou d'une norme de produit préfabriqué est considérée comme une technique non courante. Dans ce cas, la chaîne d'acteurs (maître d'ouvrage, maître d'œuvre et entreprises) doit consulter son assureur (respectivement dommages-ouvrage et responsabilité civile décennale) en amont pour vérifier l'assurabilité de la technique envisagée. Une adaptation de ses garanties peut être nécessaire et conduire à une éventuelle surprime qu'il faudra intégrer dans les coûts du projet.

Toutefois, certains bétons bas carbone qui ne relèvent pas de la technique courante, par exemple ceux validés par une approche performantielle, semblent avoir une consolidation et un recul techniques suffisants, qui peuvent leur permettre d'être validés plus facilement par les contrôleurs techniques et les assureurs.

DOMAINE D'ANALYSE DE LA COMMISSION PRÉVENTION PRODUITS (C2P)



*La procédure d'évaluation par Pass'Innovation n'est plus instruite par le CSTB depuis septembre 2017. Cependant, ceux délivrés avant cette date restent en vigueur jusqu'à fin de validité.

ANNEXE

Références

- Aïtcin, Sidney Mindess, Ecostructure en béton, Comment diminuer l'empreinte carbone des structures en béton, Pierre-Claude 2018, 276 pages, Éditions Eyrolles.
- Bellanger J. et al., Béton et carbone, Le Moniteur, 28 février 2020.
- Casimir S., 2019, L'industrie cimentière vers le très bas carbone, Cahier CBPC.
- Cementing the European Green Deal – Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050, CEMBUREAU (The European Cement Association)- www.cembureau.eu
- Habert G., Paving The Path Toward Sustainable Concrete, keynote session at "Concrete 2015, Construction Innovation: Research into Practise", 27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia, 2015
- Infociments, Vers un Green Deal de l'industrie cimentière, 2017
- Jacquemot F., Rougeau P. Béton bas carbone focus sur les nouveaux liants, , Études et Recherches Cerib, mars 2020
- Jacquemot F., 2014, Accélération du durcissement des liants à base de laitier de haut-fourneau pour les produits préfabriqués en béton, Université Lille 1 - Sciences et Technologies.
- Petitpain M., 2017, Bétons à faible impact environnemental pour l'industrie du béton : accélération du durcissement de bétons à base de liants ternaires, Université Lille1 - Sciences et Technologies.
- Scrivener K.L, Vanderley, M.J., Gartner, E.M., 2018, Eco-efficient cements : Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry, Cement and Concrete Research, 114, 2-26.
- Shi C., Qu B., Provis J.L., 2019, Recent progress in low-carbon binders, Cement and Concrete Research, 122, 227-250.
- Souchu P., 2010, Le ciment sursulfaté, lettre infos du lerm. <http://doc.lerm.fr/>
- Souchu P., 2011, Les ciments sulfo-alumineux, lettre infos du lerm. <http://doc.lerm.fr/>
- ATILH, Déclaration environnementale produit, Ciments courants français, 2015
- UNPG, Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches meubles et massives, 2011
- NF EN 206/CN (décembre 2014). Béton - Spécification, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206.
- NF EN 13 369 (novembre 2013). Règles communes pour les produits préfabriqués en béton.
- NF EN 13 670/CN (février 2013, tirage 2 d'avril 2013). Exécution des structures en béton – Complément national à la NF EN 13 670 : 2013.
- NF EN 15 978 mai 2012 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul
- NF EN 15 804/CN juin 2016 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction - Complément national à la NF EN 15 804+A1
- NF EN 1992-1-1 (octobre 2005, tirage 4 de mai 2013). Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments.
- NF EN 1992-1-1/A1 (février 2015). Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments.
- NF EN 1992-1-1/NA (mars 2016). Eurocode 2: calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments - Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-1 : 2005 - Règles générales et règles pour les bâtiments.
- Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton. Application de l'approche performantielle (mars 2010). Recommandations provisoires LCPC.
- Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons (mars 2009). Guide FNTF/FFB/CERIB/FIB.

RETROUVEZ TOUS NOS OUTILS ET NOS PUBLICATIONS SUR :

<https://qualiteconstruction.com/nos-ressources>



COLLECTION « 12 ENSEIGNEMENTS À CONNAÎTRE »

Cette collection capitalise les points de vigilance et les bonnes pratiques observés sur le terrain sur des bâtiments précurseurs en termes de performance énergétique et environnementale. Elle se base sur des audits *in situ* et des interviews des acteurs des projets.



COLLECTION « POINTS DE VIGILANCE »

Ces études thématiques se focalisent sur les pathologies de produits ou procédés au cœur de la performance énergétique et environnementale des bâtiments. Elles expliquent les désordres observés et leurs causes, et livrent les bonnes pratiques.



COLLECTION « PLAQUETTES TECHNIQUES »

Ces plaquettes traitent des points sensibles entraînant des pathologies qui trouvent leur source dans les défauts liés aux difficultés de conception ou d'exécution des acteurs.



COLLECTION « FICHES PATHOLOGIE BÂTIMENT »

À partir des constats réalisés sur le terrain par des experts, ces 75 Fiches établissent le diagnostic des pathologies récurrentes dans le bâti. Elles préconisent les bonnes pratiques, s'appuient sur des photos commentées et listent les textes de référence.



Mais aussi

- DES PHOTOS DE DÉSORDRES
- DES VIDÉOS DE BONNES PRATIQUES
- DES OUTILS NUMÉRIQUES (Sites internet, AppliQC...)
- DES MOOC
- DES FICHES TECHNIQUES
- LES MÉMO CHANTIER®
- LA REVUE QUALITÉ CONSTRUCTION
- UNE NEWSLETTER...

