

Les
ressources

NOTE D'INFORMATION

**SOLUTIONS EN BÉTON À IMPACT
ENVIRONNEMENTAL RÉDUIT
DANS LES OUVRAGES D'ART**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INTRODUCTION

Dans un contexte général de préservation de l'environnement, les enjeux de développement d'éco-matériaux dans une démarche d'économie circulaire deviennent forts, notamment dans le secteur de la construction. L'utilisation d'une solution en béton à impact environnemental réduit dans le cas des ouvrages d'art constitue une action susceptible de pouvoir répondre à ces enjeux environnementaux, sous réserve de respecter certaines prescriptions, contraintes et d'intégrer la démarche dans le planning des travaux.

Cette note d'information à destination des maîtres d'ouvrages explicite les possibilités offertes par la NF EN 206+A2/CN et le fascicule 65 du CCTG *Travaux pour la mise en œuvre de ces solutions en béton dans le domaine des ouvrages d'art*.

SOMMAIRE

1 • Notion de solutions en béton à impact environnemental réduit	p. 4
2 • Impacts et leviers d'action	p. 6
3 • Contexte normatif et réglementaire	p. 8
4 • Granulats	p. 10
5 • Liants	p. 11
6 • Conclusion	p. 14



Mâchefers © Laurent Mignaux/Terra

1 • NOTION DE SOLUTIONS EN BÉTON À IMPACT ENVIRONNEMENTAL RÉDUIT

Il est important de rappeler en premier lieu que raisonner uniquement à l'échelle du matériau, comme peut y inciter l'usage des termes « bétons verts », « bétons bas carbone » ou « bétons environnementaux », pourrait conduire à se satisfaire de choisir des formules de béton plus performantes du point de vue environnemental, sans une approche globale des impacts. Ainsi, dans une évaluation comparative des bilans carbone associés à un mètre cube de béton peut être performante mais l'est moins à l'échelle de l'ouvrage (par exemple, si les épaisseurs des pièces de béton sont plus importantes).

Par ailleurs, concernant la terminologie « bétons environnementaux », cette notion de vertu demeure difficile à quantifier, de par sa complexité. En effet, être « vertueux » sur le plan environnemental renvoie globalement à tous les indicateurs environnementaux classiques (usage des ressources naturelles, émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), impact sur l'eau, biodiversité, etc.). L'urgence climatique et les

contraintes sur les ressources met en avant les enjeux de décarbonation des industries et l'émergence d'une économie circulaire. Il s'agit également de garantir une durabilité adaptée de l'ouvrage, celle correspondant à la durée d'utilisation prévue au projet (DUP).

L'émergence aux plans national et international des enjeux environnementaux du développement durable a mis en lumière les quantités importantes d'émissions de CO₂ engendrées par la fabrication du ciment Portland de type CEM I et la consommation difficilement soutenable de ressources naturelles (eau, granulats naturels etc.) par le secteur de la construction. Cette consommation induit une dépendance de plus en plus forte vis-à-vis de ressources sous contraintes, en particulier si une politique d'entretien suffisamment stricte n'est pas mise en place pour entretenir et adapter à temps le patrimoine bâti (ouvrages de génie civil et bâtiments) plutôt que de le laisser se dégrader au point de devoir reconstruire.

Dans un contexte général d'éco-conception et de durabilité des ouvrages, Il est urgent d'adapter le secteur de la construction, afin d'apporter une réponse à ce qui est devenu une demande sociétale et économique : baisser l'empreinte environnementale des ouvrages tout en maintenant (voire améliorant) un niveau de durabilité correspondant à l'environnement d'usage. Les actions à mener doivent ainsi apporter des réponses à la fois pour la préservation des ressources non renouvelables et notre indépendance vis-à-vis des matières (réemploi et recyclage). Ces actions doivent exploiter les effets de levier sur la décarbonation des activités (circuits courts et éco-conception) et favoriser l'emploi local tout en garantissant la protection de l'environnement et la santé humaine.

Outre ces actions, une attention particulière devra être portée aux prescriptions à respecter dans la mise en œuvre du matériau le plus adapté à l'environnement d'exposition. En effet, le cumul excessif de prescriptions, dans une visée sécuritaire, peut conduire à l'obtention d'injonctions techniques contradictoires (exemple : développer des résistances élevées ou avoir des forts dosages en liant sans générer un dégagement excessif de chaleur etc.).

En plus de cet écueil, la demande de recourir à des ciments plus réactifs, induit un bilan carbone plus défavorable et la possible apparition de pathologies (réaction sulfatique interne (RSI), fissuration) pour les parties massives d'ouvrages.

La prescription d'un béton à impact environnemental réduit passe donc d'abord par la juste prescription au niveau de l'ouvrage :

- d'une Durée d'Utilisation prévue au Projet (DUP) adaptée au besoin réel;
- de classes d'expositions adaptées par parties d'ouvrages (en évitant la sur-prescription). Pour l'aide à la prescription, on se référera utilement aux documents de l'EFB (2010) ainsi que, pour les classes XF, aux recommandations Gel (UGE, 2021);
- de dispositions favorisant une conception économe sur l'ensemble des quantités des différents matériaux en tenant compte de leur impact (béton, armatures, câbles);

- de dispositions favorisant une réponse ajustée de la formulation du béton à la performance de durabilité spécifiée, que ce soit par l'application de l'approche prescriptive avec les nouvelles possibilités de la norme Béton, ou par application de l'approche performantielle (FD P18-480); ce choix est guidé par la disponibilité des matériaux localement et par leur performance;
- de dispositions favorisant l'utilisation de l'eau recyclée selon le contexte;
- de l'ensemble des caractéristiques fondamentales nécessaires à la justification de résistance mécanique et de la stabilité de l'ouvrage : par exemple, outre la résistance du béton, son module, son retrait et son fluage pour les ouvrages sensibles.

Au niveau du bilan carbone, il est important de bien définir l'unité fonctionnelle qui fera l'objet de l'évaluation de l'empreinte carbone. En effet, la pertinence de l'analyse nécessite de raisonner à l'échelle de la structure en considérant toute la durée de vie de l'ouvrage.

2 • IMPACTS ET LEVIERS D'ACTION

Ressources minérales

Selon les chiffres de l'UNPG, la consommation des granulats s'est élevée à 453 Mt en 2019 (UNPG, pour le BTP), alors qu'elle était de 380 Mt en 2012. La pression sur les ressources naturelles ne cesse de croître, avec une demande en matériaux de plus en plus importante, alors que dans le même temps la réglementation sur les granulats alluvionnaires se durcit avec un encadrement et une limitation de leur exploitation. La réglementation relative à l'envoi en Installations de Stockage des Déchets Inertes (ISDI) des granulats se durcit également, via l'augmentation de la taxe, ce qui devrait participer à la promotion des matériaux alternatifs. Il s'agit en particulier des granulats recyclés, issus de chantiers de déconstruction, dont la qualité permet un usage en béton de structure.

Au regard des autres constituants, l'impact des granulats sur les émissions de GES reste faible et celui-ci est principalement lié au transport¹. De plus, en raison de leurs caractéristiques intrinsèques, l'usage de granulats recyclés peut conduire à des surdosages en liant/ciment, ce qui peut aggraver le bilan carbone du béton. L'intérêt d'usage de granulats recyclés est donc principalement de lutter contre l'épuisement des ressources naturelles.

Ciments

Même si les volumes de béton impliqués dans le domaine du génie civil sont nettement plus faibles que ceux liés au domaine du bâtiment, l'utilisation de dosages en liant plus élevés – en lien avec les performances attendues plus élevées et la durée d'utilisation prévue au projet de 100 ans - conduit à s'interroger sur les leviers d'action à mettre en œuvre pour réduire l'impact environnemental. La réduction de l'impact environnemental du ciment est en effet primordiale, dans la mesure où l'empreinte carbone du ciment représente environ 80% de celle du béton, même si ce dernier va subir une carbonatation naturelle partielle, qui le conduira à fixer du CO₂ tout au long de la vie de l'ouvrage, c'est-à-dire jusqu'au premier lit des armatures.

Depuis 2001, la production de ciment en France (tous domaines confondus) a augmenté jusqu'à atteindre 22,2 Mt en 2007, avant de baisser de 20% et se stabiliser entre 2014 et 2020, avec une production de 17,5 Mt (source France Ciment, 2023). Pour la production française, environ 2/3 de ces émissions sont relatives à la décarbonation du calcaire, alors que 1/3 provient de la combustion nécessaire à la calcination du cru. Dans la seconde feuille de route de décarbonation de l'industrie cimentière (source France Ciment, 2023), il est prévu de baisser les émissions de 27% et 90%, respectivement à horizon 2030 et 2050 par rapport à 2015.

Quatre leviers d'actions devraient permettre d'atteindre l'objectif pour 2030 :

- la réduction de la teneur en clinker des ciments ;
- l'augmentation de la part des combustibles alternatifs jusqu'à 80% ;
- l'augmentation de la part de biomasse dans les combustibles ;
- l'amélioration de l'efficacité énergétique des fours.

L'objectif fixé pour 2050 ne peut être atteint que si ces moyens sont complétés par le captage et le stockage du CO₂. Pour accélérer l'atteinte de ces objectifs, les premières installations relatives à ce dernier levier devraient voir le jour avant 2030.

Concernant le premier levier d'action, l'objectif est de substituer une partie du clinker par d'autres constituants minéraux qui émettent moins de CO₂, de par leur mode de fabrication. Le tableau 1 présente l'empreinte carbone (moyenne nationale) des ciments courants couverts par la norme NF EN 197-1 proposés par les adhérents de France Ciment.

¹ La distance peut être un handicap pour l'usage des granulats recyclés, à la fois pour des raisons économiques et environnementales (coût et impact carbone du transport, notamment routier, varient simultanément). Il existe probablement une marge de progression pour utiliser les granulats recyclés à proximité du lieu où ils sont générés, en particulier en zone urbaine ou en périphérie des agglomérations. Des développements prometteurs sont également attendus pour recarbonater le sable issu du recyclage de matériaux de démolition, améliorer ses caractéristiques et limiter le besoin de surdosage en liant lors de son emploi.

Tableau 1 : moyenne nationale de l’empreinte carbone de quelques ciments normés (source France Ciment, 2023)

Type de ciment	CEM I	CEM II/A-S, A-M, A-V	CEM II/A-L	CEM II/B-M	CEM II/B-L	CEM V/A	CEM III/A non PM-ES	CEM III/A PM-ES	CEM III/B	CEM III/C
% de clinker	95-100	80-94	80-94	65-79	65-79	40-64	35-64	35-40	20-34	5-19
Kg eq. CO ₂ /t	752	619	640	554	547	479	467	334	316	199

Pour les ciments de type CEM II/C-M. et CEM VI, les valeurs provisoires de l’empreinte carbone en kg eq. CO₂ par tonne sont dans l’attente de l’homologation des Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES).

La production des bétons à faible impact environnemental passe ainsi par l’utilisation des ciments composés contenant moins de clinker, partiellement remplacé par divers constituants minéraux :

- **fillers** : les fillers et additions calcaires sont issus du broyage fin des roches calcaires et dolomitiques. Les additions siliceuses sont, elles, issues du lavage et séchage du quartz pour les additions de minéralogie Qz et à partir de cristobalite calcinée pour les additions de minéralogie Cb ;
- **les pouzzolanes naturelles** : elles sont issues des roches d’origine volcanique ;
- **les argiles calcinées** : il s’agit d’argiles calcinées entre 700 et 850 °C, pour leur conférer les propriétés pouzzolaniques recherchées. Le métakaolin (MK) en fait partie ;

- **laitier de haut fourneau (LHF), Fumée de Silice (FS) et Cendres Volantes (CV)** : ces matériaux correspondent à des co-produits industriels revalorisés dans la filière béton. Les LHF, FS et CV sont respectivement des co-produits de la fonte, de l’industrie de silicium et des chaudières des centrales à charbon.

Dans un contexte où la réglementation relative au stockage des déchets devient de plus en plus exigeante, cette démarche s’inscrit également dans les méthodologies permettant de réduire le volume des déchets ultimes n’ayant pas d’autre solution que la mise en décharge.

Additions

Les constituants minéraux utilisés dans les ciments composés peuvent également être utilisés comme additions dans les bétons, en substitution partielle du ciment.

Le tableau 2 présente l’empreinte carbone moyenne des différentes additions utilisées dans le béton.

Tableau 2 : empreinte carbone de différentes additions utilisées dans le béton (source Cerib, 2022)

Addition	Norme Produit	Empreinte (kg CO ₂ eq./ tonne)
Fillers et additions calcaires	NF P 18-508	30-60
Additions siliceuses	NF P 18-509	60-120
Métakaolin	NF P 18-513	139-239
Laitier moulu de Haut Fourneau	NF EN 15167	100
Cendres Volantes (siliceuse)	NF EN 450	47,5
Fumée de Silice	NF EN 16622	354

3 • CONTEXTE NORMATIF ET RÉGLEMENTAIRE

Il n'existe pas actuellement de définition consensuelle des « bétons bas carbone ». Les « bétons bas carbone » revêtent des réalités très disparates et ne constituent pas le seul levier permettant de réduire l'impact environnemental (potentiel de réchauffement climatique global) au niveau de l'ouvrage ou de l'unité fonctionnelle. Il en résulte des difficultés d'appréciation pour le donneur d'ordre qui n'est pas toujours en mesure de faire aisément la part des choses entre label commercial et réalité technique.

Compte-tenu des enjeux, des travaux normatifs ont été engagés par la commission de normalisation P18B relativement à la définition des bétons bas carbone. Au sein de cette commission, le groupe d'experts « solutions bas carbone » (GE SBC)² a élaboré une proposition cohérente avec celle en cours de discussion au niveau de la normalisation européenne : il s'agit de caractériser le béton par son appartenance à une classe de réduction de l'empreinte carbone, à résistance, classe d'exposition et durée d'utilisation de projet données, par rapport à une base correspondant au béton « minimal » imposé par la norme (dosage minimal en liant, en particulier) dont le liant ne serait constitué que d'un ciment de référence défini nationalement (par exemple CEM I). Les classes correspondraient à des plages de réduction de 10%, ce qui est assez cohérent avec les réductions que permettent des changements de types de ciment (CEM II, CEM III/A, CEM V etc.). Cette proposition devrait être intégrée à la prochaine révision du complément national à la norme NF EN 206, dont la mise à l'enquête devrait intervenir en 2024.

Il est par ailleurs prévu de clarifier la prescription de cette classe et l'interprétation de la façon d'y satisfaire, deux options sont possibles :

- **option 1** : on utilise le dimensionnement du projet avec un béton répondant à cette classe de réduction du potentiel de réchauffement climatique GWR (global warming potential reduction) ;
- **option 2** : on utilise un béton d'une classe GWR éventuellement plus faible que celle spécifiée, mais compte tenu du redimensionnement du projet (variante tenant compte de l'amélioration possible des performances mécaniques ou de durabilité) le changement

des quantités conduit à une « réduction d'empreinte carbone intégrale » au moins égale à celle de l'option 1 à l'échelle de l'ouvrage.

Sans attendre la mise en place de ces dispositions, le corpus normatif actuel permet d'optimiser dès à présent les systèmes constructifs et les formules de béton en vue d'obtenir un impact environnemental moindre. Un bref rappel des différents textes utiles est présenté ci-après.

Hiérarchie des textes

Au niveau européen, les documents de base régissant la conception et la vérification des ouvrages sont les Eurocodes. Ce référentiel garantit le respect des exigences essentielles définies dans la directive produit de la construction, à savoir d'abord la résistance mécanique et la stabilité des ouvrages. Les paramètres fondamentaux sont la résistance mécanique du béton, sa robustesse face aux agressions chimiques (eau, sels, gaz carbonique etc.) ou mécaniques (choc, abrasion etc.) et les paramètres définissant ses déformations à court et long terme (module de déformation, retrait et loi de fluage).

Au niveau européen, le document de base régissant l'exécution des structures en béton est constitué par la norme NF EN 13 670/CN et par la norme NF EN 13 369 pour les produits préfabriqués en usine. Ces normes, dont le fascicule 65 du CCTG Travaux constitue le document d'application en France pour le domaine du Génie Civil, renvoient pour la prescription des bétons à la norme NF EN 206+A2/CN.

La norme NF EN 206+A2/CN (appelée communément « norme béton ») couvre les bétons de structure, dont la durée d'utilisation prévue au projet est de 50 ans. Elle définit la responsabilité des acteurs, l'appellation des bétons, leur prescription ainsi que les exigences liées à leur production, leur contrôle de fabrication et leur livraison.

Le fascicule 65 du CCTG Travaux renforce, entre autres, ces exigences, pour prendre en compte les durées d'utilisation prévues au projet de 100 ans.

Ces deux textes autorisent deux modalités de prescription des bétons : la méthode prescriptive et la méthode performantielle.

² Ce groupe d'expert constitué en mai 2021, a démarré ses travaux en mars 2022 suite à la validation de la lettre de mission du groupe.

Méthode prescriptive

La méthode prescriptive consiste à respecter des limites de composition préétablies (teneur minimale en liant équivalent, rapport maximal eau efficace sur liant équivalent, taux maximal de substitution du ciment par une addition dans le liant équivalent, teneur minimale en air occlus, caractéristiques complémentaires du liant etc.), en fonction des classes d'exposition auxquelles est soumis le béton et de la durée d'utilisation prévue au projet.

Ces limites sont spécifiées dans le tableau 8b du fascicule 65 du CCTG Travaux (DUP de 100 ans).

Les bétons formulés en respectant ces limites de composition sont **réputés** satisfaire aux durées d'utilisation prévues au projet prescrites du point de vue de la durabilité.

L'aptitude à l'emploi de l'ensemble des ciments couverts par les normes NF EN 197-1 et NF EN 197-5, et d'une large gamme d'additions normalisées, constitue déjà de fait un levier important pour optimiser l'empreinte environnementale de la formule du béton.

Méthode performantielle

La méthode performantielle consiste à prendre en compte la durabilité du béton armé par la caractérisation des propriétés de transfert ou de la résistance à une pathologie, plutôt que par le respect d'exigences de moyens.

Une telle approche permet ainsi de coller plus finement à la durabilité réelle du béton armé, mais nécessite des études et contrôles plus poussés que ce qui devrait être réalisé au moyen de l'approche prescriptive. Le choix de sa mise en œuvre sera guidé par les constituants disponibles, leur performance et la robustesse de la formule.

La méthode peut être mise en œuvre, selon les cas, au moyen de l'une des deux approches suivantes :

- **l'approche absolue**, basée sur la caractérisation des grandeurs liées aux propriétés de transfert (porosité à l'eau, coefficient de migration des ions chlorure, résistivité électrique) ou à la vitesse de propagation de pathologies (vitesse de carbonatation accélérée) et la comparaison des mesures effectuées avec des **seuils de conformité préétablis** ;
- **l'approche comparative**, basée sur la vérification que le développement de la pathologie visée est plus lent que ce que l'on obtient sur un béton dit « de référence » (béton amélioré conforme à la méthode prescriptive).

La norme NF EN 206+A2/CN autorise la mise en place de la méthode performantielle via le FD P18-480. Ce fascicule définit les modalités d'application de l'ensemble de la démarche : appellation des bétons, niveau de contrôle, contenu des épreuves, méthodes d'essais, seuils de conformité, exigences pour les laboratoires et les centrales à béton etc. Il couvre les durées d'utilisation de projet de 50 et 100 ans. Il peut permettre de valoriser des granulats locaux ne répondant pas à certaines exigences, de diminuer les teneurs en liant de formules et d'augmenter la proportion d'additions dans le liant au-delà des limites de l'approche prescriptive, ce qui peut constituer un levier complémentaire d'optimisation environnementale, notamment si cela n'est pas possible avec les ciments disponibles localement.

Point de vigilance

La dernière révision du fascicule 65 du CCTG Travaux (2017) avait intégré un chapitre (§8.1.1.4) sur la mise en œuvre de la méthode performantielle. Ce chapitre est techniquement obsolète et doit être remplacé par les spécifications du FD P18-480 relatives à la durée d'utilisation prévue au projet de 100 ans et au niveau d'application N3 de l'approche performantielle.

La révision du fascicule 65 a été engagée en 2023. Dans l'attente de la publication de la version révisée dudit fascicule, une mention doit être faite en ce sens au moment de la rédaction des marchés de travaux pour éviter toute difficulté d'interprétation en phase chantier.

Proposition de clause à insérer au marché :

« Par dérogation au fascicule 65 du CCTG Travaux, les dispositions du chapitre 8.1.1.4 de ce fascicule sont à remplacer par les dispositions du FD P18-480 « Béton - Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle », en prenant en compte le niveau d'application N3 et la Durée d'Utilisation de Projet de 100 ans ».

Cas particulier des bétons d'ingénierie

Le fascicule 65 du CCTG Travaux autorise l'utilisation de bétons dits « **d'ingénierie** », permettant l'emploi simultané de deux ciments ou l'utilisation de liants ayant une forte teneur en laitier. Ils sont définis par la norme NF EN 206+A2/CN.

Ces bétons font l'objet d'une vigilance plus importante, notamment via la réalisation d'une étude préliminaire définie dans la norme NF EN 206+A2/CN et nécessitent une expérience particulière en formulation des bétons. L'épreuve d'étude telle que prescrite au Fascicule 65 vaut étude préliminaire.

Les bétons d'ingénierie basés sur l'utilisation de laitiers permettent :

- d'améliorer l'adéquation de certaines formules de béton en termes de durabilité, en étalant le dégagement de chaleur et/ou en offrant une bonne résistance aux agressions chimiques ;
- d'améliorer le bilan carbone des formulations de béton considérées, en diminuant la part de clinker et en favorisant l'utilisation d'un coproduit de l'industrie de la fonte.

4 • GRANULATS

De manière générale, les granulats utilisés dans les ouvrages en génie civil doivent être conformes aux normes en vigueur (NF EN 12620+A1 et la NF P18-545) relatives aux granulats pour bétons hydrauliques. Cela concerne les granulats naturels, récupérés et recyclés. Pour ces derniers, et suite aux travaux menés dans le cadre du projet national RECYBETON (RECYBETON, 2018), des propositions d'évolution normative relatives à leur usage dans le béton ont été faites et reprises dans la dernière version de la NF EN 206+A2/CN.

Selon le fascicule 65 du CCTG Travaux, l'utilisation des **granulats récupérés** est autorisée si la classe de résistance en compression visée est inférieure à C35/45, sous réserve que leur proportion ne dépasse pas 5% de la quantité totale des granulats. Pour ce qui est de **granulats recyclés**, l'usage des gravillons de béton recyclé (GBR) de type 1 (au sens de la NF EN 206+A2/CN) est autorisé, si ces derniers proviennent de la démolition d'ouvrages de génie civil dont la traçabilité est garantie, pour les bétons de classe de résistance inférieure à C35/45 en classes XC1, XC2, XC3, XC4 ou XF1, avec un taux de substitution maximum de 20%. Les modalités pratiques d'utilisation de ces granulats (conformité, contrôles) sont définies dans la norme NF EN 206+A2/CN.

La méthode performantielle permet de valoriser certains granulats locaux dont l'utilisation serait problématique dans le cadre d'une approche prescriptive.

En application du FD P 18-473, il est ainsi possible d'utiliser des granulats issus d'excavations rendues nécessaires pour la réalisation du projet d'infrastructure, dont la teneur en sulfates solubles dans l'acide (déterminée selon l'EN 1744-1+A1) dépasse le seuil imposé par la NF P18-545, sous réserve de prendre les dispositions préventives nécessaires, définies dans l'annexe NA.E de la norme NF EN 206+A2/CN. Le tableau 3 résume la catégorie des valeurs maximales de cette teneur.

Tableau 3 : catégorie des valeurs maximales de la teneur en sulfates solubles dans l'acide des granulats sulfatiques (FD P18-473)

Granulats	Teneur en sulfates solubles dans l'acide Pourcentage en masse	Catégorie L_AS
Granulats sulfatiques	$SO_3 \leq 0,8 \%$	L_AS0,8
	$SO_3 \leq 2,0 \%$	L_AS2,0
	$SO_3 \leq 3,5 \%$	L_AS3,5

Le FD P18-480 permet quant à lui de déroger aux exigences suivantes, relatives à la qualité des granulats :

- classes d'exposition XF4 et XA3 : absorption d'eau déclarée indiquée A et autres caractéristiques indiquées A ou B;
- classes de résistance caractéristique en compression supérieures ou égales à C35/45 : caractéristiques indiquées A ou B, granulats avec au plus deux caractéristiques indiquées C ou D après étude ou références.

L'application de la méthode performantielle pour une DUP de 50 ans va certainement permettre d'élargir la gamme des matériaux utilisés, elle se développe notamment dans la perspective du respect des objectifs de la RE2020 dans le domaine du bâtiment, et pourrait concerner les bétons des équipements d'ouvrage ou des équipements de la route, dont la durée d'utilisation de projet est compatible. En revanche, l'utilisation de granulats aux caractéristiques dérogatoires dans des bétons associés à une DUP de 100 ans restera limitée, si certains verrous réglementaires relatifs aux prescriptions des matériaux ne sont pas levés.

5 • LIANTS

Les normes autorisent plusieurs leviers pour réduire l'impact environnemental des liants et donc des formulations de béton. Cet aspect ne couvre toutefois qu'une partie de la problématique, **l'évaluation environnementale devant être réalisée à l'échelle de la structure.**

Choix des ciments

Historiquement depuis le milieu du XX^e siècle, les ouvrages étaient réalisés essentiellement sur la base de ciments de type CEM I, constitués d'au moins 95% de clinker et d'au plus 5% de constituant secondaire.

Ce choix découlait de la volonté d'obtenir rapidement des résistances en compression élevées et de la primauté attribuée au clinker pour la réalisation de bétons durables. L'approche privilégiant ce type de ciment peut :

- impacter dans une certaine mesure le bilan carbone de la formulation de béton considérée, du fait de la part prépondérante de clinker dans sa composition;
- ne pas être nécessairement adapté en environnement chloruré agressif (zones de marnage des ouvrages en milieu marin, par exemple) pour lesquels il faut privilégier la résistance améliorée des liants comportant des additions pouzzolaniques.

En outre, le choix d'un CEM I nécessite :

- d'être vigilant dans son emploi pour les éléments massifs ou des éléments étuvés au risque de pathologies graves liés à des dégagements de chaleur mal maîtrisés pendant la prise et le durcissement du béton (réactions exothermiques, cf. Guide RSI IFSTTAR 2017);
- de limiter son emploi pour éviter la surqualité dans une gestion raisonnée des matériaux.

Il existe de nombreuses catégories de ciments qui ne sont plus constitués uniquement de clinker, par exemple :

- les CEM II/A ou B (ciments composés), ayant au moins 65% de clinker et au plus 35% d'un constituant principal autre que le clinker (laitiers de haut-fourneau, fumée de silice etc.);
- les CEM II/C-M. (ciments composés), ayant au moins 50% de clinker et au plus 50% de deux constituants principaux autres que le clinker (laitiers de haut-fourneau, fumée de silice etc.);
- les CEM III/A ; B ou C (ciments de haut-fourneau), contenant entre 5 et 64% de clinker et entre 36 et 95% de laitier de haut-fourneau;
- les CEM IV/A ou B (ciments pouzzolaniques);
- les CEM V/A ou B (ciments pouzzolaniques au laitier).;

- les CEM VI (ciments composés) ayant au moins 35% de clinker, entre 31 et 59% de laitier de hauts fourneaux et entre 6 et 20% d'un constituant principal autre que le clinker et le laitier de hauts fourneaux (pouzzolane naturelle, cendre volante siliceuse ou filler calcaire).

Leur utilisation, tout à fait couverte par la NF EN 206+A2/CN, permet :

- d'améliorer le bilan carbone d'une formule de béton considérée, en utilisant moins de clinker ;
- de valoriser des déchets ou sous-produits issus de l'industrie (cas des cendres volantes, des fumées de silice et des laitiers de haut-fourneau) ;
- d'avoir une meilleure adéquation avec les besoins en termes de durabilité, en adéquation avec les spécifications du FD P 18-011 ;
- d'étaler les dégagements de chaleur liés à la prise et au durcissement du ciment.

Compte-tenu de l'existence de cette large gamme de ciments, il convient de ne pas chercher à imposer un type de ciment en particulier dans un marché, mais plutôt de renvoyer pour le choix aux textes généraux cadrant l'usage des ciments, en particulier :

- la norme NF EN 206+A2/CN, complétée par le fascicule 65 du CCTG Travaux ;
- le FD P 18-011, qui spécifie les types de ciments à utiliser en fonction de l'agressivité des milieux ;
- le cas échéant, les guides techniques applicables à l'ouvrage concerné (Recommandations Gel UGE 2021, Recommandations RSI IFSTTAR 2017).

De nouveaux types de ciments, ne relevant pas des normes NF EN 197-1 et NF EN 197-5, ont récemment émergé ou sont en passe d'être proposés sur le marché, dans le cadre de la stratégie bas carbone. Ces ciments peuvent être couverts par des normes spécifiques ou bénéficier d'une évaluation technique européenne par exemple.

3 Ces dispositions consistent normalement en une demande d'avis technique, le Cerema préparant la constitution d'une commission à cet effet (disposition parallèle à ce qui existe dans le domaine du bâtiment). Un référentiel national pour contribuer notamment à la délivrance des avis techniques est en cours d'élaboration au sein du groupe « Solutions Bas Carbone » (GE SBC) de la commission AFNOR/P18B. L'attention est attirée sur le fait que dans une démarche d'analyse de risque, la démonstration d'aptitude à l'emploi est susceptible d'entraîner des essais en nombre et complexité croissant avec l'ampleur du domaine revendiqué.

Il convient de ne pas interdire par principe leur utilisation, mais, en l'absence d'aptitude à l'emploi explicite au sens de la norme NF EN 206+A2/CN, il est nécessaire d'adopter des dispositions permettant de vérifier que leur domaine d'emploi et leurs conditions particulières d'utilisation sont adaptés au domaine du génie civil³, et plus spécifiquement aux conditions d'exposition et à la durée d'utilisation de projet prévues pour l'ouvrage. En outre, l'applicabilité des règles de dimensionnement de l'Eurocode 2 nécessite d'être justifiée. L'attention est attirée sur le délai nécessaire à la constitution du dossier justificatif correspondant et sur le délai d'instruction associé.

Notion de liant équivalent

Lorsque des additions sont mélangées au ciment en centrale à béton, la notion de **liant équivalent** permet d'adapter la composition du liant aux besoins du chantier. Elle est définie par la norme NF EN 206+A2/CN.

Ce concept autorise la prise en compte d'une partie des additions de type II et de certaines additions de type I au moyen :

- d'un **coefficient d'équivalence k**, permettant de déterminer pour chaque addition, le ratio massique d'addition pouvant être substituée au ciment tout en maintenant un niveau de performance réputé équivalent. Les valeurs de ce coefficient sont spécifiées dans le tableau NA.9 de la norme NF EN 206+A2/CN.
- d'un **ratio maximal A/(A+C)**, correspondant à la quantité maximale d'addition (A) pouvant être prise en compte dans le liant équivalent en substitution du ciment. Les valeurs limites sont spécifiées dans le tableau 8B du fascicule 65 du CCTG Travaux (DUP de 100 ans) et rappelées ci-après.

Dénomination de l'addition	Valeur du coefficient k
Additions de type II	
Cendres volantes	0,40, 0,50 ou 0,60 selon la performance de l'addition
Fumée de silice	1,00 ou 2,00 selon la performance de l'addition et la formulation du béton
Laitier vitrifié de haut-fourneau	0,60 ou 0,90 selon la performance de l'addition
Métakaolin de type A	1,00
Additions de type I	
Additions calcaires	0,25
Additions siliceuses	0,25

On obtient alors la quantité de liant équivalent par la relation $L_{eq} = C + k.A$ avec

- **C** : teneur en ciment (CEM I ou CEM II/A)
- **k** : coefficient d'équivalence de l'addition considérée
- **A** : quantité d'addition pouvant être prise en compte dans le liant équivalent

C'est cette grandeur qui est utilisée dans le tableau 8B du fascicule 65 du CCTG Travaux, tant pour le respect de la teneur minimale en liant équivalent que pour la vérification de la valeur maximale du ratio Eau efficace/Liant équivalent, lié à la durabilité du béton armé.

Il est ainsi possible, en jouant tant sur le choix du ciment que sur les additions (nature et quantité), de réduire le bilan carbone d'une formule donnée.

Possibilités offertes par la méthode performantielle

Le nouveau fascicule de documentation FD P18-480 permet de déroger, sur la base d'une méthode performantielle, aux règles définies dans le cadre de la méthode prescriptive par la norme NF EN 206+A2/CN pour le dosage minimal en liant équivalent et le rapport maximal eau efficace sur liant équivalent.

Les conditions à respecter en termes de formulation sont les suivantes :

- teneur en liant total minimal de 260 kg/m³ pour les classes d'exposition XC et XF1; 300 kg/m³ pour les autres classes;
- teneur en clinker du liant total au moins égale à 15%.

Les essais étant longs, il est nécessaire de bien prendre en compte leur durée dans la phase de préparation du chantier, qui sont réalisés à 90 j d'âge en étude et convenance (même si on peut s'appuyer sur les résultats à 28 j si la conformité est atteinte dès cet âge).

Ces dispositions sont applicables au domaine du Génie Civil, à condition d'avoir introduit dans les pièces de marché la clause (proposée en fin de la partie 3 du présent document) relative à l'application du FD P18-480 avec un niveau d'application N3 et une durée d'utilisation prévue au projet de 100 ans, en remplacement des dispositions du § 8.1.1.4 du fascicule 65 du CCTG Travaux.

La méthode performantielle constitue ainsi une alternative efficace pour diminuer les bilans carbone tout en garantissant les performances mécaniques et de durabilité du béton mis en œuvre.



Laitier de haut fourneau à Fos-sur-Mer (13) © CC BY-SA 4.0 Deed

6 • CONCLUSION

Adopter une solution en béton à impact environnemental réduit consiste, d'abord, à réaliser l'analyse d'optimisation à l'échelle de l'ouvrage et à utiliser un ou plusieurs bétons répondant de manière optimale aux besoins visés et ayant des performances qui ne sont :

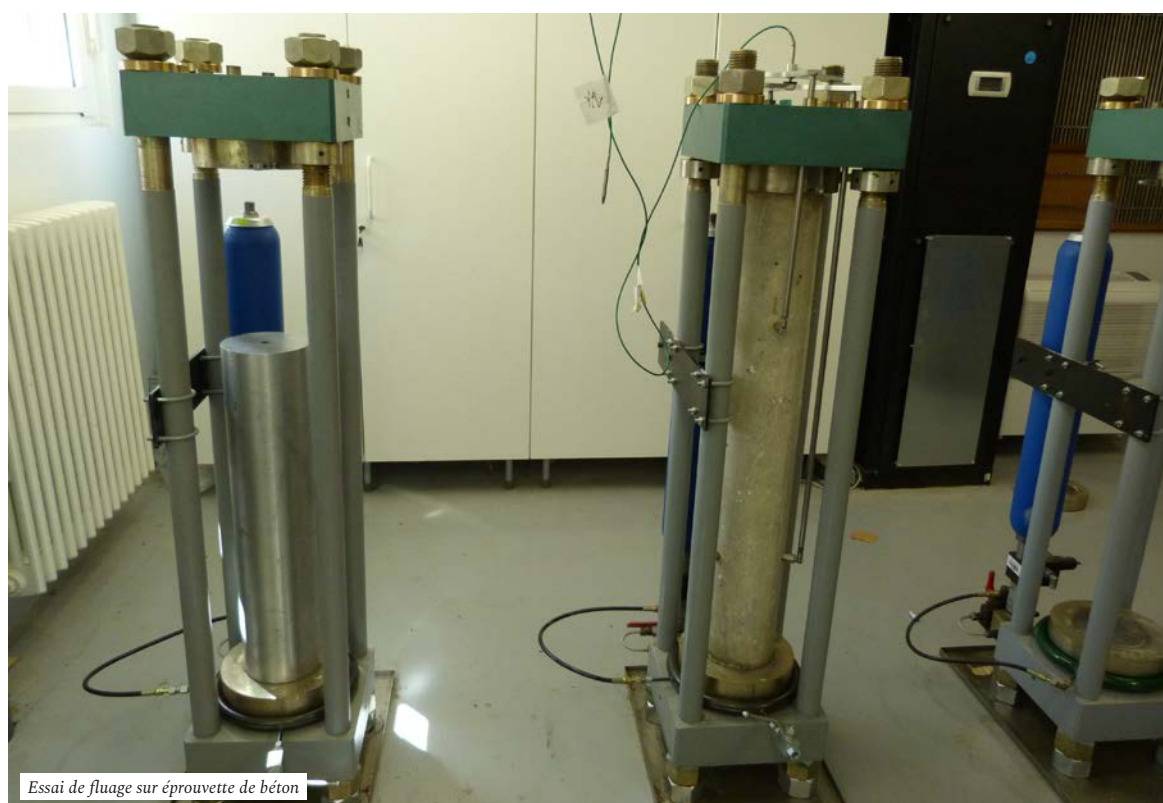
- ni surestimées, pour préserver les ressources et éviter d'utiliser des liants trop performants par rapport à l'objectif visé ;
- ni sous-estimées, ce qui conduirait à devoir intervenir sur l'ouvrage pendant sa durée d'exploitation.

Une attention particulière doit donc être portée sur la **bonne définition de la DUP et des classes d'exposition, ainsi que des caractéristiques mécaniques essentielles (résistance, déformation à court et long terme).**

Afin d'éviter de brider l'innovation et la proposition de solutions adaptées à un contexte particulier, il convient d'**éviter de verrouiller le choix des constituants en amont** au-delà de ce que les textes (normes, CCTG, fascicules de documentation, guides techniques) prévoient.

Selon les constituants disponibles localement, la mise en place de la **méthode performantielle** offre des perspectives intéressantes en matière d'économie de ressources (utilisation possible d'une plus large gamme de granulats locaux) et de diminution des émissions des gaz à effet de serre (optimisation des dosages en liant et de la nature du liant). **Une attention particulière doit toutefois être portée à la durée des essais et à la nécessité d'intégrer la démarche dans la phase de préparation du chantier. À cet égard :**

- pour pallier le délai des essais performantiels de durabilité dans le cas des ouvrages courants où il peut être critique, il est recommandé de s'appuyer sur des formules préqualifiées, qui peuvent également trouver leur intérêt en préfabrication ;
- les différents intervenants doivent adopter les dispositions organisationnelles et mobiliser les capacités techniques et les compétences actualisées nécessaires à la conduite d'une telle démarche. En particulier les laboratoires en charge de réaliser les essais doivent disposer de références justifiant la pratique effective de ces essais et la vérification des résultats obtenus sur la base d'essais d'intercomparaison (cf. FD P18-480).



Essai de fluage sur éprouvette de béton

GLOSSAIRE

Source : NF EN 206+A2/CN

Addition. Constituant minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

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

Ciment. Matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Clinker. Constituant du ciment obtenu par cuisson à très haute température d'un mélange composé d'environ 80% de calcaire et de 20% d'argiles. Il s'agit du constituant principal du ciment Portland (CEM I).

Durée d'Utilisation prévue au Projet (DUP). Période présumée pendant laquelle la structure ou l'un de ses éléments est destiné (e) à être employé (e) conformément à son utilisation prévue, sous condition de maintenance prévue, mais sans que des réparations majeures soient nécessaires.

Eau Efficace. Différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbée par les granulats.

Granulat récupéré. Granulat récupéré par lavage ou par concassage.

Granulat récupéré par concassage. Granulat obtenu par concassage du béton durci, qui n'a pas été précédemment utilisé en construction.

Granulat récupéré par lavage. Granulat obtenu par lavage du béton frais.

Granulat recyclé. Granulat obtenu par traitement de matériaux minéraux auparavant utilisés en construction.

Liant équivalent. Concept prescriptif, défini dans la norme NF EN 206+A2/CN, autorisant la prise en compte partielle des additions de type II et de certaines additions de type I pour le calcul de la quantité minimale de liant à incorporer au mélange.

Liant total. Somme des quantités de ciment(s) et d'addition(s).

Méthode performantielle. Méthode de justification de la durabilité basée sur des exigences de performance des bétons, évaluée par des mesures d'indicateurs de durabilité et de grandeurs associées à la durabilité.

Méthode prescriptive. Méthode de justification de la durabilité basée sur des exigences de composition (dosage et nature des constituants).

RSI. Réaction sulfatique interne.

DONNÉES ILLUSTRATIVES

1. Optimisation de l’empreinte environnementale par choix d’un béton à très hautes performances (BTHP) dans le cas du tablier précontraint de passages supérieurs à dalle précontrainte

L’exemple est issu du cas des ouvrages jumeaux (passages supérieurs sur la déviation de Bourges) réalisés dans le cadre du Projet National BHP 2000 (ENPC 2005 : Synthèse des travaux du PN BHP 2000, V. Baroghel-Bouny *et al.* 1998).

Le tableau ci-dessous permet de comparer deux solutions pour la réalisation du tablier d’un passage supérieur avec précontrainte :

- une dalle en béton C35/45;
- une dalle en béton C80/95.

La solution la moins émissive en carbone correspond à l’utilisation d’un béton à très hautes performances C80/95. C’est aussi la solution la plus économique.

	Dalle en béton C35/45* précontraint *271 kgCO ₂ eq/m ³	Dalle en béton C80/95* précontraint *335 kgCO ₂ eq/m ³
Élancement	1/22	1/30
Épaisseur (m)	1	0,54 à 1
Épaisseur équivalente (m)	0,75	0,37
Poids du tablier (t)	975	520
Volume de béton	390 m ³ 105 495 kgCO ₂ eq	188 m ³ 62 974 kgCO ₂ eq
Armatures passives 1140 kgCO ₂ eq/t	39 t 44 460 kgCO ₂ eq	39 t 44 460 kgCO ₂ eq
Précontrainte 1140 kgCO ₂ eq/t	12 t 13 680 kgCO ₂ eq	8 t 9 120 kgCO ₂ eq
Total kgCO ₂ eq/t	163 635	116 554
Coûts (€) estimés en 2000 au m ² utile, y compris les fondations	991	982

2. Optimisation de l’empreinte environnementale de formules de béton par utilisation de ciments à faible teneur en clinker

Tableau 4 : tableau comparatif des principales performances mécaniques, environnementales et de durabilité de quelques bétons du projet national PERFDUB susceptibles d’une justification en classe d’exposition XC4

Béton	B1	B15	B16	B22	B23	B24	B33	B36	B37
Liant	280 kg CEM I	362 kg CEM I	350 kg CEM II/A-S	357 kg CEM II/A-LL	350 kg CEM II/A-S	342 kg CEM II/A-S	370 kg CEM III/A	369 kg CEM V/A (S/V)	369 kg CEM V/A (S/V)
Eau efficace/liant	0,59	0,48	0,5	0,49	0,49	0,5	0,45	0,45	0,45
fc28 (MPa) val. moyenne	43	58	51	53	46	44	52	49	56
Granulats	G2	G1	G1	G1	G2	G5	G1	G4	G3
Classe	C35/45	C50/60	C40/50	C45/55	C35/45	C35/45	C40/50	C40/50	C45/55
Résistivité (ohm.m) carac.	69	63	84	58	84	59	-	117	419
Porosité accessible à l’eau à 90 j (%) moyenne/carac.	16,9/18,2	13,6/14,6	13,7/14,8	13,4/14,4	15,3/16,5	13,3/14,3	14,0/15,1	19,6/21,1	12,8/13,8
Vcarbo accélérée (mm/j ^{1/2}) carac.	1,38	0,72	0,87	0,92	0,30	1,39	0,51	2,08	1,28
XC 100 ans appr. perf.	XC4 minor.1	XC4 minor.2	XC4 minor.2	XC4 minor.2	XC4 minor.2	XC4 minor.1	XC4 minor.2	XC2 minor.1	XC4 minor.2
Kg CO ₂ eq/t (contribution du liant)	214	277	238	241	238	233	162	179	179

Données issues de l’ouvrage de synthèse « Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton », éd. Eyrolles, 2023.

À noter : tous les bétons considérés respectent la classe minimale C30/37, cependant B1 n’est pas conforme aux spécifications associées à la classe d’exposition XC4 selon l’approche prescriptive, et B36 bien que conforme selon l’approche prescriptive ne satisfait pas aux seuils de la classe XC4 selon le FD P18-480.

La comparaison entre B16, B23 et B24 illustre l’influence du squelette granulaire (type de granulats).

La comparaison entre B1 et B15 illustre l’excès de performances (mécanique et de durabilité) auquel conduit l’approche prescriptive dans le cas de l’utilisation du CEM I en classes XC.

La comparaison entre B15, B16, B22, B33 et B36 illustre principalement l’effet du changement de la nature du ciment (complété pour B36 par un changement de nature des granulats), pour une résistance en compression visée proche.

La comparaison entre B36 et B37 montre l’effet du changement de granulats, conduisant à une formule B37 beaucoup plus compacte, de résistivité supérieure, et de performances mécaniques et de durabilité assez proches de B15 pour une empreinte carbone largement diminuée.

RÉFÉRENCES

LES OUVRAGES

- Véronique BAROGHEL-BOUNY, Patrick ROUGEAU, Sabine CARÉ, Josette GAWSEWITCH. *Étude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges. I – Microstructure, propriétés de durabilité et retrait*, Bull. LCPC, 1998, 214, pp. 61-73
- Sous la direction de D. BRAZILLIER. *Synthèse des travaux du Projet National BHP 2000 sur les bétons à hautes performances*, Presses de l'ENPC, 2005, p. 197
- Sous la direction de François CUSSIGH et Gilles ESCADEILLAS. *Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton. De la qualification en laboratoire au suivi d'exécution*, 2023, Éditions Eyrolles
- CERIB. *Ressources minérales pour les liants des bétons décarbonés : disponibilité, perspectives d'évolution et innovations*, 563E, 2022
- EFB. *Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages d'art en béton*, juin 2010
- EFB. *Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages divers de génie civil*, novembre 2010
- EFB. *Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages maritimes et fluviaux*, novembre 2010
- EFB. *Guide pour le choix des classes d'exposition des tranchées couvertes, galeries, casquettes et caissons immergés*, octobre 2010
- EFB. *Guide pour le choix des classes d'exposition des tunnels routiers creusés*, novembre 2010
- FRANCE CIMENT. *Feuille de route de décarbonation de la filière Ciment*, mai 2023. <https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/enjeux/décarbonation/feuille-de-route-ciment.pdf>
- FRANCE CIMENT. *Moyenne France Ciment pour les ciments de ses adhérents*, février 2023. <https://www.infociments.fr/ciments/telecharger-les-declaration-environnementale-produit-dep-ciments>
- IFSTTAR. *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne*, octobre 2017
- IREX. *Comment Recycler le béton dans le béton : Recommandations du Projet National RECYBETON*, novembre 2018

- MTES. *Fascicule 65 du CCTG Travaux. Exécution des ouvrages de génie civil en béton*, décembre 2017, arrêté du 28 mai 2018
- UGE. *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Environnements hivernaux rigoureux*, octobre 2021
- UNPG. *Granulats : les statistiques annuelles 2019*, décembre 2021

LES NORMES

- FD P18-011. *Béton - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons*, juin 2022
- FD P18-473. *Recommandations provisoires pour l'utilisation dans les bétons de granulats dont la teneur en sulfates est supérieure aux seuils normalisés vis-à-vis de la formation d'ettringite secondaire d'origine interne et de thaumasite d'origine interne*, novembre 2022
- FD P18-480. *Béton - Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle*, octobre 2022
- NF EN 12620+A1. *Granulats pour béton*, juin 2008
- NF EN 13369. *Règles communes pour les produits préfabriqués en béton*, novembre 2023
- NF EN 13670/CN. *Exécution des structures en béton - Complément national à la NF EN 13670 : 2013*, février 2013
- NF EN 15167-1. *Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité*, septembre 2006
- NF EN 15167-2. *Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 2 : évaluation de la conformité*, septembre 2006
- NF EN 16622. *Fumées de silico-calcium pour béton - Définitions, exigences et critères de conformité*, décembre 2015
- NF EN 1744-1+A1. *Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : analyse chimique*, février 2014

- NF EN 197-1. *Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*, avril 2012
- NF EN 197-5. *Ciment - Partie 5 : ciment Portland composé CEM II/C-M. et Ciment composé CEM VI*, mai 2021
- NF EN 206+A2/CN. *Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206*, novembre 2022, 2e tirage du 01/12/2022
- NF EN 450-1. *Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité*, octobre 2012
- NF EN 450-2. *Cendres volantes pour béton - Partie 2 : évaluation de la conformité*, octobre 2005
- NF P 18-508. *Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité*, janvier 2012
- NF P 18-509. *Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses - Spécifications et critères de conformité*, septembre 2012
- NF P 18-513. *Addition pour béton hydraulique - Métakaolin - Spécifications et critères de conformité*, août 2012
- NF P18-545. *Granulats - Éléments de définition, conformité et codification*, octobre 2021

LE CEREMA, DES EXPERTISES AU SERVICE DES TERRITOIRES

Le Cerema est un établissement public qui apporte son expertise pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires. Grâce à ses 26 implantations partout en France, il accompagne les collectivités dans la réalisation de leurs projets. Le Cerema agit dans 6 domaines d'activité : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

> Téléchargez nos publications sur doc.cerema.fr

SOLUTIONS EN BÉTON À IMPACT ENVIRONNEMENTAL RÉDUIT DANS LES OUVRAGES D'ART



INTERVENANTS

Rédacteurs :

Amor Ben Fraj, Alexandre Pavoine et Michaël Dierkens (Cerema)

Contributeurs et relecteurs :

Pierre Corfdir (Cerema), François Toutlemonde (Université Gustave Eiffel, président de la commission de normalisation des Bétons)

Les membres du Groupe de Travail du Fascicule 65. Sont notamment remerciés pour leur relecture : Patrick Rougeau (Cerib), Thibaut Perrin (Cinov-Ingénierie), François Cussigh (EGF-BTP), Jean-Marc Potier (SNBPE), Louis Marracci et Nastaran Vivan (Syntec), Hervé Marneffe (VNF).

CONTACTS

DTecITM@cerema.fr



EXPERTISE & INGÉNIERIE TERRITORIALE | BÂTIMENT
| MOBILITÉS | INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT |
ENVIRONNEMENT & RISQUES | MER & LITTORAL



www.cerema.fr

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Siège social : Cité des mobilités - 25 avenue François Mitterrand - CS 92803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30 -
Achevé d'imprimer : mars 2024 - Dépôt légal : mars 2024 - ISSN : 2969-1036 - Imprimeur : Dupliprint - 733 rue Saint Léonard 53100
Mayenne - Tél. +33 (0)2 43 11 09 00 - Photo couverture et dos : © ITiMTanG/iStock - Crédits photos Cerema sauf mention contraire