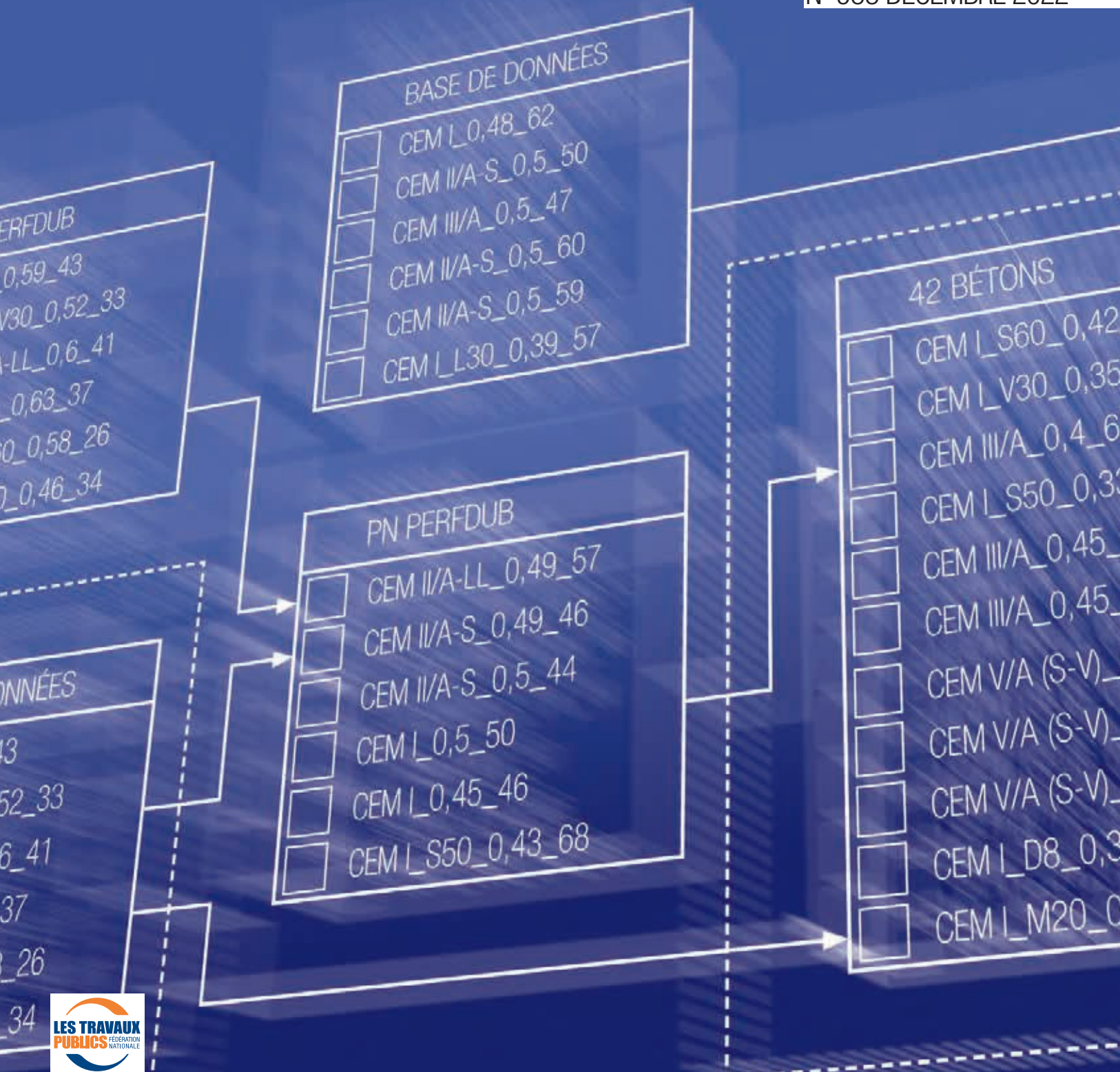


SPÉCIAL BÉTONS DU FUTUR. PROJET NATIONAL PERFDUB. DONNEES OBTENUES SUR LES OUVRAGES EXISTANTS. LES 42 BÉTONS DU PN PERFDUB. MODELISATION DU VIEILLISSEMENT DES OUVRAGES. EVALUATION DES PERFORMANCES DES BÉTONS. CORROSION DES BÉTONS ARMES AU LABORATOIRE ET SUR SITES. IMPRESSION 3D BÉTON. BÉTONS BAS-CARBONE. BÉTONS ULTRA BAS CARBONE : VOUSOIRS ET PAROI MOULEE. VIADUC DE MILLAU : GARANTIR UNE DUREE D'UTILISATION DE 120 ANS

N° 983 DÉCEMBRE 2022





GLOBAL CONSTRUCTEUR

L'assurance de l'activité professionnelle des entreprises du BTP

Votre entreprise, vos chantiers et vos clients sont couverts en un seul et unique contrat.

Toutes nos solutions d'assurance sur www.auxiliaire.fr



Directeur de la publication
Bruno Cavagné

Directeur délégué
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03
morgenthalerm@fnfp.fr

Comité de rédaction

Jean-Bernard Datry (Setec),
Denis Etienne (Bouygues),
Philippe Gotteland (Fnfp),
Ziad Hajar (Systra),
Florent Imbert (Razel-Bec),
Nicolas Law de Lauriston (Vinci),
Romain Léonard (Demathieu Bard),
Claude Le Quéré (Egis),
François Louvel (Spie Batignolles),
Véronique Mauvisseau (Ingerop),
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),
Jacques Robert (Arcadis),
Claude Servant (Eiffage),
Nastaran Vivan (Artelia),
Michel Morgenthaler (Fnfp)

Ont collaboré à ce numéro

Rédaction
Sophie Le Renard (actualités),
Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente

TBS GROUP
Service Abonnement Revue Travaux
235, avenue le Jour se Lève
92100 BOULOGNE BILLANCOURT
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22
Fax +33 (0)1 40 94 22 32
revue-travaux@cometcom.fr

France (9 numéros) : 190 € TTC
International (9 numéros) : 240 €
Enseignants (9 numéros) : 75 €
Étudiants (9 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)

Publicité

Rive Média
10, rue du Progrès - 93100 Montreuil
Tél. : 01 41 63 10 30
www.rive-media.fr

Directeur de clientèle
Bertrand Cosson -
b.cosson@rive-media.fr
L.D. : 01 41 63 10 31

Site internet : www.revue-travaux.com

Édition déléguée

Com'1 évidence
2, chemin dit du Pressoir
Le Plessis
28350 Dampierre-sur-Avre
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52
revuetravaux@com1evidence.com

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux).

Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957), qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

Éditions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
ISSN 0041-1906

LES BÉTONS DU FUTUR ?



© DR

D'abord une conviction : les bétons sont pluriels, pas seulement par leur résistance, et devront demain continuer à être pensés au pluriel. Une norme unique va de C8/10 à C100/115, mais les bétons non-structurels, ceux d'ouvrages provisoires, les bétons routiers, les bétons de fibres ou les BFUP, entre autres, nécessitent une prescription différenciée, et l'impact environnemental des spécifications devra être revu et pesé au regard des performances constructives et de durabilité attendues. Car les bétons sont en première ligne de l'exigence de sobriété et de décarbonation qu'exprime la société, mais les leviers pour l'atteindre sont multiples.

À l'échelle du liant, réduction de la teneur en clinker des ciments et valorisation étendue mais contrôlée des additions minérales grâce à une justification performantielle de la durabilité sont deux voies importantes ouvertes par la révision 2022 de la norme NF EN206/CN. Ces voies continuent à être explorées pour, sous quelques années, élargir la gamme des constituants des ciments et additions minérales en valorisant davantage les ressources naturelles ou issues du recyclage, au-delà des co-produits d'industries qui auront parallèlement optimisé leurs procédés. Mais les élargissements normatifs ne seront acceptables que par une connaissance scientifique avancée de la microstructure des liants, sécurisant leur emploi, dépassant l'approche empirique par ingrédient.

À l'échelle du matériau béton, l'usage étendu des granulats recyclés et la possibilité d'utiliser dans des conditions strictes certains matériaux d'excavation dérogeant aux seuils usuels de teneur en sulfates sont les autres avancées principales de la version 2022 de la norme. Mais dans la perspective d'une gestion plus circulaire des ressources, la pertinence économique de ces solutions est locale, ce qui heurte l'ambition universaliste des normes et complique la mutualisation des moyens nécessaire à l'évaluation.

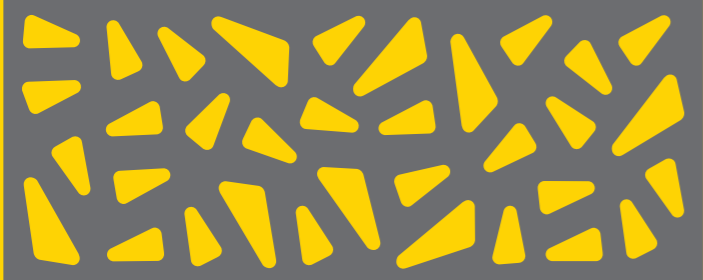
Plus globalement, c'est à l'échelle des ouvrages que l'avenir des bétons nécessitera d'importantes adaptations : sobriété quantitative par une conception intégrant dès le départ les choix optimisés de matériaux fonction de leurs propriétés, pouvant conduire à privilégier BTHP ou BFUP dont l'analyse de cycle de vie pertinente ne s'apprécie pas au m³, mais en rapport avec l'unité fonctionnelle et sa durabilité ; choix constructifs renouvelés, abandonnant sans doute tels voiles en béton banché ou autres gaspillages traditionnels, et supprimant le "trop bon béton" là où il n'est pas nécessaire ; développement des solutions multi-matériaux, supposant une ingénierie et des modes d'organisation productive appropriés.

En effet si l'avenir des bétons passe par de bons projets, il se jouera aussi en phase de réalisation : cure plus soignée pour les liants à prise lente ; sécurisation par limitation des opérations sur site et attention à leur efficacité ; anticipation des problèmes de constructibilité par une maîtrise améliorée de l'écoulement des bétons frais ; maîtrise de la complexité normative... les sujets à risque ne manquent pas. Sans céder aux promesses de la fabrication digitale généralisée, la réduction de l'aléa dû aux facteurs humains et organisationnels est un défi financier et social autant que de formation et d'assurance de la qualité posé à toute la profession de la construction et à ses clients.

Les bétons du futur, alors ? Si nous en prenons les moyens, et déjà en nous instruisant à la lecture de ce numéro, ils resteront des produits et des outils de notre liberté de construire, aménager et entretenir. Liberté créatrice et responsable...

FRANÇOIS TOUTLEMONDE

UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL,
DIRECTEUR DU DÉPARTEMENT
MATÉRIAUX ET STRUCTURES



SPÉCIAL BÉTONS DU FUTUR

VIADUC DE MILLAU, UN OBJECTIF DE DURABILITÉ DE 120 ANS © EFFAGE



04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



16 ENTRETIEN AVEC
PATRICK ROUGEAU
CERIB -
LES PISTES POUR RÉDUIRE L'EMPREINTE
CARBONE DES SYSTÈMES CONSTRUCTIFS
EN BÉTON

24 ARGECO DÉVELOPPEMENT -
MÉTAKAOLIN FLASH : UNE ADDITION
"VERTE" POUR LES BÉTONS À FAIBLE
IMPACT ENVIRONNEMENTAL

32

**ENJEUX ET PERSPECTIVES
DU PN PERFDUB**

36

**RECUEIL ET ANALYSE
DES DONNÉES OBTENUES
SUR LES OUVRAGES
EXISTANTS**

41

**BASE DE DONNÉES
DU PN PERFDUB ET SES
42 BÉTONS CARACTÉRISÉS**
Quelles exploitations possibles ?

48

**MODÉLISATION
DU VIEILLISSEMENT
DES OUVRAGES**
et contractualisation
de l'approche performantielle

55

**ÉVALUATION DES PERFOR-
MANCES DES BÉTONS**
de l'amélioration d'essais de
durabilité existants à la définition
de nouveaux protocoles

60

**LA CORROSION
DES BÉTONS ARMÉS
DU PN PERFDUB**
au laboratoire et sur sites

66

IMPRESSION 3D BÉTON
Des premiers essais
à l'industrialisation des chantiers

72

LES BÉTONS BAS-CARBONE
Étude d'un Immeuble
de Grande Hauteur

79

**GRAND PARIS EXPRESS
LIGNE 18 LOT 1**
Mise en place des
premiers voussoirs EXEGY®
Ultra Bas Carbone

84

**PORT 2000 (PHASE 3)
AU HAVRE**
Développement, essais et mise en
œuvre de béton ultra bas carbone lors
de la réalisation de la paroi moulée

90

VIADUC DE MILLAU
Démarche durabilité pour garantir
une durée d'utilisation du projet
de 120 ans



PREMIERS VOUSSOIRS EXEGY® ULTRA BAS CARBONE

Vinci Construction a mis en œuvre des voussoirs préfabriqués en béton EXEGY® Ultra Bas Carbone sur la Ligne 18 du Grand Paris Express qui relie la gare d'Aéroport-d'Orly à la gare de Versailles-Chantiers, longue de 35 km. Il s'agit du tunnel du lot 1, de diamètre intérieur 8 m et d'une longueur de 11,8 km. La mise au point de ces voussoirs a fait l'objet d'études et d'essais poussés.
(Voir article page 79).



© EXEGY®

POSE DU PONT AU-DESSUS DE LA SEINE, QUI RELIE LE VILLAGE DES ATHLÈTES



© DÉPARTEMENT DE SEINE-SAINT-DENIS

Dans la nuit du 28 au 29 octobre 2022, installation du tablier du nouveau pont sur la Seine.

Dans la nuit du vendredi 28 au samedi 29 octobre 2022, le pont qui relie les deux rives du village des Athlètes, entre Saint-Denis et l'Île-Saint-Denis, a été acheminé par bateau pour être posé. La livraison de cet ouvrage d'art, infrastructure réalisée dans le cadre des Jeux Olympiques Paris 2024, est prévue à l'été 2023.

Un nouveau pont fut posé sur la Seine... En effet, ce n'est pas si courant qu'un nouvel ouvrage d'art prenne son envol pour relier deux villes : Saint-Denis et l'Île-Saint-Denis (Seine-Saint-Denis) sur le territoire desquelles est implanté le Village des Athlètes. Dans la nuit du vendredi 28 au samedi 29 octobre 2022, tout un aréopage d'officiels était venu regarder la mise en place de cette charpente de 1 500 tonnes d'acier, 138 mètres de long, se hisser à la perpendiculaire du fleuve (pour les détails techniques, voir *Revue Travaux* 981).

→ Le pont acheminé par bateau

Les professionnels qui ont travaillé à la réalisation de ce pont conçu par un groupement d'entreprises mené par Eiffage

géné civil, étaient vêtus d'orange fluo. Les représentants de l'État, préfet, sous-préfet mais aussi des collectivités locales, le président du département et les maires des communes concernées ainsi que les autres élus du territoire, étaient bien sûr présents. Cet ouvrage d'art dédié aux piétons, aux cyclistes et aux bus doit permettre de desservir le village des Athlètes qui est en cours de construction sur les deux rives de la Seine.

Après un assemblage de sa charpente métallique au port de Gennevilliers, le pont a été acheminé par bateau avec le concours de Voies navigables de France.

Le tablier a été installé entre 20h et 10h du matin et la livraison complète de l'ouvrage est prévue à l'été 2023. Le coût de cette infrastructure est estimé à 32,1 M€ financés à 90 % par les apports de l'État, du Département de la Seine-Saint-Denis, de la Région Île-de-France, de l'EPT Plaine Commune, de la Ville de Paris, et à 10 % par la Métropole du Grand Paris.

→ Relier le village des athlètes

« La pose de ce nouveau franchissement est une étape majeure pour donner au village des Athlètes son futur visage. Indispensable pour les athlètes pendant les Jeux, il deviendra ensuite un véritable trait d'union entre les deux rives de la Seine, donnant à tous les habitants et usagers de ce nouveau quartier un cadre de vie agréable et confortable. » considère Nicolas Ferrand, Directeur général exécutif de la Société de Livraison des Ouvrages Olympiques (Solideo). En effet, le village olympique d'une superficie de

51 ha qui accueillera près 14 500 athlètes et leurs équipes, pendant les JO puis, 9 000 sportifs et leurs accompagnateurs durant les Jeux paralympiques, sera immédiatement converti en quartier d'habitation. « Nous allons mettre à disposition de la Solideo, les logements le 1^{er} mars 2024 et ils nous seront rendus en novembre 2024, pour une livraison des appartements au début de l'année 2026. Aucune cuisine installée, deux ascenseurs dans chaque immeuble, des stores très occultants pour permettre à certains sportifs de dormir le jour, des installations pour les personnes à mobilité réduite au-delà des normes... sont autant d'exigences imposées par les organisateurs des JO. » détaille Florence Chahid Nourai, directrice grands projets résidentiels Île-de-France, chez Icade. L'opérateur immobilier construit le quartier des Quinconces à Saint-Ouen, soit 13 immeubles en ossature bois pour 639 logements et 9 204 m² de bureaux. ■

INAUGURATION DE L'A79, SANS BARRIÈRES DE PÉAGES

L'autoroute du futur existe déjà. En effet, à terme, les barrières de péage, telles que nous les connaissons depuis l'avènement de ces infrastructures payantes, vont disparaître peu à peu.

Le 4 novembre dernier a été inaugurée et ouverte à la circulation, l'A79 reliant Montmarault (Allier) à Digoin (Saône-et-Loire), soit 92 km. Surnommée La

Bourbonnaise, cette nouvelle autoroute est dotée d'un système dit "en flux libre". Ainsi, six portiques, équipés de caméras infrarouge et de capteurs, installés le long du trajet détectent automatiquement le type de véhicule et son immatriculation afin de déterminer le montant du péage. Il existe différentes solutions de paiement soit par télépéage au moyen d'un badge fixé sur la pare-

brise de la voiture soit en se connectant sur le site "aliae.com" une carte de crédit à ma main (et en rentrant son immatriculation).

→ Faciliter la fluidité

Pour les règlements en espèces, 16 bornes seront réparties le long de l'A79. « L'infrastructure s'affranchit ainsi de toute barrière de péage physique réduisant l'emprise foncière, facilitant la fluidité

de la circulation et contribuant à moderniser le réseau d'autoroutes français. » détaille le service communication d'Eiffage qui a réalisé cette infrastructure représentant un investissement de plus de 600 M€.

L'exploitation et la maintenance de l'A79 ont été attribuées depuis le début de la concession aux équipes d'APRR, filiale autoroutière d'Eiffage. ■



> 13 agences à votre service en France - Agence Rincent Nord-Pas-de-Calais

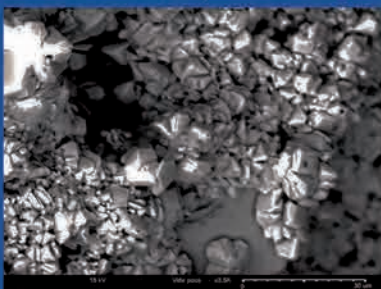


> Des moyens d'intervention

> Installation de chantier - Grand Paris



> Des laboratoires d'essais qualifiés - Agence Rincent Nord-Pas-de-Calais - COFRAC essais béton (Accréditation N°1-6895)



> Des compétences spécifiques
Microscope électronique à balayage

> Les agences Rincent Laboratoires répondent aux sollicitations techniques en s'appuyant sur les entités spécialisées qui apportent leur savoir-faire.

LES TROPHÉES EIFFEL 2022

La vitalité et la qualité de la construction en acier sont célébrées depuis 8 ans maintenant. Les Trophées Eiffel d'architecture acier 2022 ont récompensé 10 projets dans 10 catégories différentes : réemploi, apprendre, divertir, habiter, travailler, voyager, patrimoine, dynamique, micro-archi et enfin franchir. Architectes, étudiants en architecture, maîtres d'ouvrages, bureaux d'études, prescripteurs, professionnels de la filière acier-construction, plus de 500 personnes ont assisté le 6 octobre dernier, au Trianon à Paris, à la remise des prix.

84 dossiers avaient été déposés pour 10 projets distingués. Le jury était composé de sept personnes : deux journalistes spécialisés, des architectes et un ingénieur.

→ Franchir

Dans la catégorie Franchir, qui intéresse plus particulièrement les travaux publics, l'agence Nu architecture a été récompensée pour la réalisation d'une passerelle piétonne qui enjambe le Doron, à Brides-les-Bains, en Savoie. Dans cette ville thermale, cet ouvrage d'art relie les sources au parc botanique. La structure de la passerelle est en inox poli miroir, et reflète la couleur du torrent. Les garde-corps donnent à ce pont de 20 m de portée une silhouette aux lignes épurées. Ce pont a été préfabriqué en une seule pièce et installé lors d'une unique opération de grutage.



Passerelle piétonne de Brides-les-Bains récompensée dans le cadre des Trophées Eiffel.

SALLE COMBLE POUR LA JOURNÉE DE RESTITUTION DU PROJET NATIONAL PERFDUB



© IFTAR

Au pied de la tour Saint-Nicolas à La Rochelle, sont réalisés des tests de vieillissement du béton armé.

C'était l'affluence des grands jours, le 28 octobre 2022, dans les locaux de la FNTP. Un auditoire concentré pour écouter les différents interlocuteurs venus restituer leurs travaux sur la durabilité des bétons et des structures en béton.

Ces études qui allient recherche et application sur un chantier ou un ouvrage in situ, sont réalisés dans le cadre du Projet National **PerfDuB** qui se décline par "approche Performantielle de la Durabilité des ouvrages en Béton." Cette démarche à l'échelle nationale et qui a aussi une ambition européenne a été lancée en 2015 et s'inscrit dans des projets de recherche et développement qui se déploient depuis plus de 30 ans sous le format Projet National labellisé par le Réseau RAGC et administré par l'IREX (Institut pour la Recherche et l'ex-

périmentation en Génie Civil). Les résultats et recommandations à la suite de ce travail collaboratif et innovant donneront lieu à un ouvrage qui sera publié par les éditions Eyrolles, au début de l'année 2023. Une version numérique de la synthèse sera disponible, en français et en anglais, pour les partenaires, sur le site de l'IREX et de l'Association Française de génie civil (AFGC). Le Projet National PerfDuB rassemble de nombreux acteurs dans la conception, la construction et la gestion des infrastructures.

→ Approche performantielle

Ce projet réunissant toutes les parties prenantes avait pour but de définir une méthodologie par une approche performantielle de la durabilité des bétons mais aussi d'agréger les connaissances, les retours d'expérience et de combler les

manques. L'innovation consiste à ce que l'approche performantielle devienne opérationnelle et d'usage courant, ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui. Les préconisations doivent être utilisables facilement par les maîtres d'œuvre, bureaux d'étude et entreprises.

Face au manque d'essais de caractérisation rapides normalisés de la durabilité du béton, et la difficulté de certains protocoles, un travail pour classifier les essais, les rendre plus rapides et consolider certains modes opératoires a été engagé. Car comment évaluer les performances du béton ? Il faut avoir recours aux indicateurs de durabilité, aux propriétés du matériel en contrôlant le phénomène de vieillissement, la porosité, et le coefficient de diffusion des chlorures. Un essai de vieillissement accéléré représentatif du phénomène "naturel" a aussi été réalisé avec une lixiviation et une carbonatation accélérées.

→ Après Paris, trois autres journées de restitution

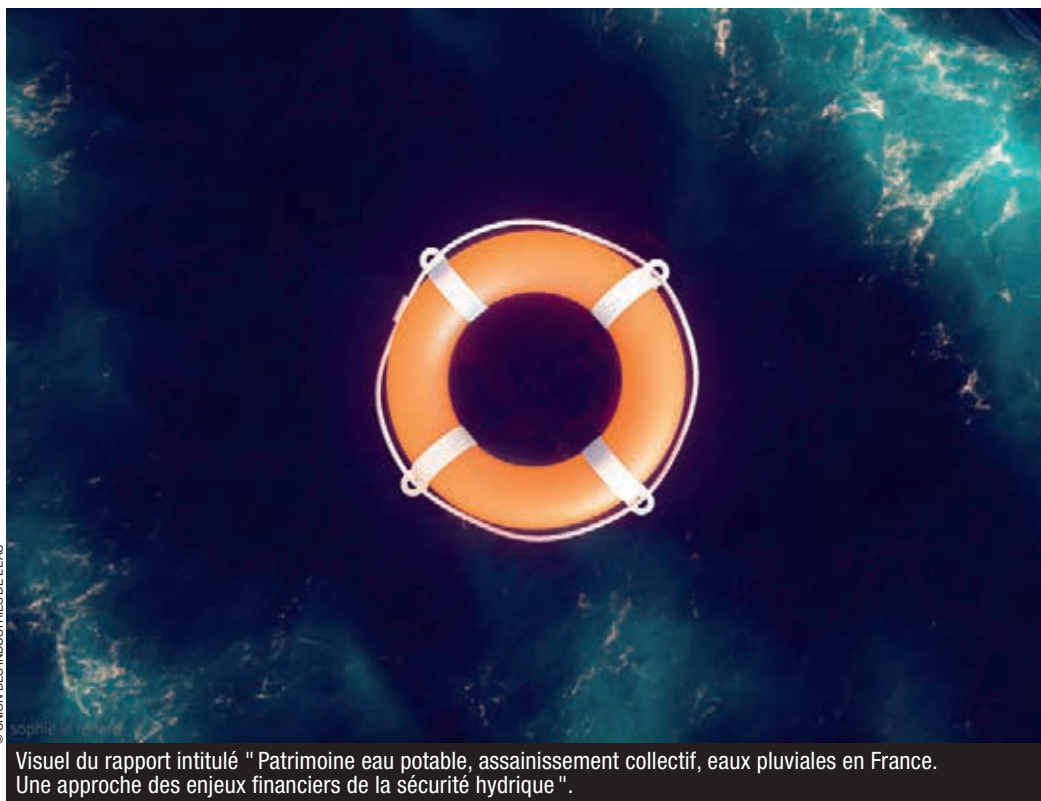
42 bétons ont été étudiés donnant lieu à la rédaction des modes opératoires des différents essais. Les prescriptions concernent des bétons normalisés intégrant des matériaux recyclés ou à faible impact environnemental. L'objectif est aussi d'optimiser le coût global et la durabilité des ouvrages neufs et de savoir requalifier les ouvrages anciens et améliorer la gestion de leur maintenance.

Tous ces sujets ont donné lieu à des interventions tout au long de la journée de restitution. La première portait sur l'évaluation des performances des bétons : de l'amélioration d'essais de durabilité existants à la définition de nouveaux protocoles, puis sur les résultats obtenus sur les ouvrages existants, sur la base de données caractérisant les 42 bétons étudiés, sur la modélisation du vieillissement des ouvrages en béton et enfin sur la mise en œuvre de l'approche performantielle.

Dans ce *Numéro 983*, six articles développent les problématiques des groupes de travail du projet et en présentent les résultats marquants.

En plus de ce rendez-vous parisien, trois autres journées de restitution ont été proposées à Toulouse (INSA de Toulouse), Lyon (INSA de Lyon), à Nantes (École Centrale de Nantes) le 18 janvier 2023. Une journée est également en préparation à Strasbourg. ■

LES INFRASTRUCTURES DE L'EAU ONT UN BESOIN URGENT D'INVESTISSEMENT



Visuel du rapport intitulé " Patrimoine eau potable, assainissement collectif, eaux pluviales en France. Une approche des enjeux financiers de la sécurité hydrique ".

Une bouée de sauvetage vogue sur la mer. L'identité visuelle choisie par l'Union des industries de l'eau (UIE) pour présenter son étude sur le patrimoine de l'eau, résume bien la situation. En effet, les infrastructures de l'eau, l'assainissement et le pluvial ont un besoin urgent de se moderniser mais aussi de se décarboner. Ce travail qui se concentre sur les moyens financiers nécessaires pour faire évoluer les réseaux d'eau, a estimé à 4,6 milliards d'euros par an les investissements nécessaires. L'UIE en appelle ainsi à une trajectoire nouvelle intégrée à la planification écologique lancée par l'État, mais qui passe aussi par la formation d'une nouvelle génération de professionnels.

La dernier état des lieux de la gestion du patrimoine eau potable, assainissement collectif et eaux pluviales, a été réalisé en 2017. Mais aujourd'hui une actualisation est nécessaire en prenant en compte les enjeux environnementaux, dans un contexte de changement climatique. En effet, les risques hydriques (quantitatifs et qualitatifs) sont exacerbés. Ainsi le coût moyen d'une reconnaissance de catastrophe naturelle pour inondation a été multiplié par 2,4 et par 3,4 pour sécheresse au cours des 20 dernières années.

Et les enjeux financiers, les moyens annuels liés au risque sécheresse devraient plus que tripler à l'horizon 2050, avec un coût cumulé estimé à 43 milliards d'euros.

→ Dégradation des moyens mobilisés

Une fois posés les besoins d'investissement à hauteur de 4,6 milliards d'euros par an, le rapport dresse un état des lieux des moyens mobilisés depuis une dizaine d'années. Une dégradation est ainsi mise en avant, avec une diminution de 10% entre 2011 et 2016 pour les services de l'eau, de plus de 20% concernant l'assainissement. Et pour les eaux pluviales « il n'y a pas d'amélioration sur la connaissance du patrimoine, des financements toujours très insuffisants et un modèle de gouvernance qui peine à se stabiliser, » note Maria Salvetti, économiste spécialisée sur la question de l'eau à l'OCDE et rédactrice de ce rapport. Mais parallèlement à ce désinvestissement, les charges d'exploitation et le prix des différents services ont augmenté en moyenne de 2% par an.

En France, environ 17 millions d'habitants sont exposés aux conséquences des inondations par débordement de cours d'eau. Les dégâts matériels entraî-

nent des dommages économiques estimés à 650 M€ par an.

→ Approche financière de la sécurité hydrique

Face à l'augmentation des pluies intenses et une imperméabilisation croissante des sols, les risques d'inondation augmentent et la gestion des eaux pluviales constitue un enjeu majeur. Une amélioration de la connaissance du patrimoine "eaux pluviales" semble nécessaire. « Il faut mettre en place un système de gouvernance et de financement efficace et pérenne pour la gestion des eaux pluviales. » affirme cette étude de l'UIE. Le coût de la dégradation des milieux aquatiques en raison du changement climatique (intensité des précipitations, fonte des neiges et des glaces, sécheresses intenses, évapotranspiration, apport d'éléments polluants avec les fortes pluies...) est évaluée à 3,7 milliards d'euros par an, même si dans le document, la complexité de ce type de calcul est stipulée. « Proposer une approche financière de la sécurité hydrique à travers la gestion des risques qualitatifs et quantitatifs liés à l'eau représente un enjeu majeur pour la pérennité des services d'eau et d'assainissement. » considère Maria Salvetti. ■

CONJONCTURE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION, AU TROISIÈME TRIMESTRE 2022

Dans sa note de conjoncture parue en novembre, l'Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction (Unicem) dresse un bilan de l'activité des matériaux au troisième trimestre de cette année. L'envolée des prix de l'énergie et du coût des intrants mais aussi à l'érosion graduelle de la demande qui en découle, ont entraîné un repli par rapport au trimestre précédent mais aussi par rapport à la même période de l'an passé. Les carnets de commandes sont encore jugés plutôt bien garnis par les professionnels du bâtiment comme par ceux des travaux publics. Mais les difficultés pour tenir les délais des chantiers en cours augmentent et le flux de nouvelles commandes tend à se raréfier.

→ Les difficultés de recrutement

Pour les granulats, leur production a fléchi de 6,9% entre septembre 2021 et 2022. Les livraisons de béton prêt à l'emploi sont 6,8% en dessous du niveau de septembre 2021. L'indicateur matériaux traduit lui aussi un recul, l'activité cédant 4,7% sur un an après avoir perdu 5,1% le trimestre précédent. Les difficultés de recrutement impactent tant le bâtiment que l'activité des travaux publics. Dans ce secteur, la moitié des entreprises ont été impactées en octobre (contre 41% en juillet) par ces problèmes de ressources humaines. Néanmoins les carnets de commande sont toujours jugés satisfaisants, notamment pour la maîtrise d'ouvrage privée.



La production de granulats a fléchi de 6,9% entre septembre 2021 et 2022.

LIGNES À HAUTE TENSION, VINCI DÉCROCHE DEUX CONTRATS AU BRÉSIL

Cobra IS, filiale de Vinci s'est vu attribuer deux marchés importants d'un montant total d'un milliard d'euros, dans l'État du Minas Gerais, territoire montagneux situé au sud-est du Brésil. Le premier est un contrat de partenariat public-privé pour la conception, la construction et l'exploitation de plus de 1 000 km de lignes à haute tension, à proximité de Sao Paulo. Six lignes de transmission seront déployées ainsi que quatre tronçons de lignes de transmission sur une distance de 63 km, une nouvelle sous-station et huit extensions de sous-stations.

→ Livraison fin 2027

Ces travaux de construction qui doivent mobiliser 5 000 employés, s'achèveront fin 2027. L'investissement représente 670 M€ pour une période d'exploitation de 30 ans. Cobra IS a signé ce marché à l'issue d'enchères organisées par l'Agence nationale de l'énergie électrique. Le second contrat de conception-construction représente un montant 386 M€. Il prévoit l'installation de 980 km de lignes de transmission dans une autre région de l'État de Minas Gerais, de trois nouvelles sous-stations et de cinq extensions de sous-stations. Ces travaux devraient mobiliser 4 900 employés pour une livraison prévue d'ici la fin de l'année 2027. Cobra IS, désormais filiale du groupe français de BTP, a été rachetée en 2021 au groupe espagnol ACS. Cette société a déjà installé au Brésil environ 32 000 km de lignes électriques depuis 20 ans.

VALTOM ÉNERGIE SOLAIRE INSTALLE 4 SITES DANS LE PUY-DE-DÔME



© VALTOM ÉNERGIE SOLAIRE

La centrale photovoltaïque de Puy-Long produit de l'électricité pour 6 000 habitants.

Les monts d'Auvergne accueillent désormais des infrastructures photovoltaïques. Une première centrale a été mise en service en juillet 2022, à Miremont (Puy-de-Dôme), une seconde a été inaugurée en octobre sur le site de stockage de déchets non dangereux du Puy-Long, à Clermont-Ferrand. Deux autres installations d'énergie solaire auront lieu à la fin de cette année.

La création de ces 4 parcs photovoltaïques est le fruit d'un partenariat entre le Valtom, collectivité publique régionale

en charge de la valorisation et du traitement des déchets ménagers et l'entreprise Sergies producteur d'énergies renouvelables. En 2020, ces deux entités ont créé Valtom Énergie Solaire, une société de projets de production et de vente d'énergie verte, sur tout le territoire du Puy-de-Dôme.

→ 22 275 panneaux solaires

La centrale photovoltaïque de Puy-Long produira chaque année 11 000 MWh d'électricité, soit la consommation de plus de 6 000 habitants (hors chauffage).

Sur une superficie de 10 ha, la production d'énergie solaire fait partie d'un site de 55 ha au total, qui est dédié à la gestion des déchets du Puy-de-Dôme, depuis les années 50. Aujourd'hui, cette installation de stockage de déchets non dangereux réceptionne deux fois moins de déchets qu'en 2012. Aussi le parc photovoltaïque constitue une opportunité pour valoriser du foncier qui n'était plus exploité.

Cette centrale solaire a nécessité un investissement de 8,3 M€. Après l'installation du poste de transformation électrique, 2 864 blocs de béton rectangulaires ont été posés, sur lesquels se trouvent 22 275 panneaux solaires qui ont été assemblés à Châtelleraut.

À terme, les quatre sites permettront de produire, sur une surface totale de 18 ha avec une puissance proche de 20 MW, environ 19 000 MWh d'électricité renouvelable, ce qui représente la consommation électrique annuelle de plus de 10 300 habitants (hors chauffage). 16 M€ ont été investis dans ces projets qui ont aussi bénéficié d'un financement participatif. Plus de 130 citoyens ont répondu à la campagne de crowdfunding, 250 000 euros ont ainsi été recueillis. ■

EIFFAGE VA PARTICIPER À LA MODERNISATION DU PORT D'ANVERS-BRUGES

À travers sa filiale belge, Herbosch-Kiere, Eiffage a remporté en groupement avec Artes Roegiers, Artes Depret et Boskalis le contrat de modernisation du terminal Europa dans le port d'Anvers-Bruges. Le montant total du marché s'élève à 335 M€, la partie attribuée à Eiffage est de 129 M€. Le port d'Anvers-Bruges est confronté à la nécessité d'améliorer les espaces dédiés au traitement des conteneurs dont la taille ne cesse de grandir, entraînant une congestion portuaire. Ainsi, le projet du terminal Europa a pour objectif d'augmenter sa capacité d'un tiers. Une stratégie fédérale a été annoncée pour que le port devienne une infrastructure de production et de diffusion de l'hydrogène vert. Des travaux maritimes de grande ampleur seront réalisés avec un futur amarrage de navires à tirant d'eau de 16 m contre 13,5 m actuellement. Un nouveau mur de quai,

avec une nouvelle orientation, sera réalisé, permettant un passage des navires à une distance plus protectrice de la réserve naturelle de Galgenschoor afin de mieux préserver la faune et de la flore maritime. Ce chantier nécessite la construction d'une retenue d'eau provi-

soire pour faciliter la démolition de l'ancien mur de quai. Débutés en septembre 2022, les travaux se déroulent en trois phases (sur 9 ans) afin que le terminal puisse rester en service et aussi pour tenir compte du trafic maritime attendu dans les prochaines années. ■



© PORT OF ANTWERP-BRUGES

La transformation du port d'Anvers-Bruges va durer 9 ans.

Digitalisation des activités

Travail collaboratif

Partage des données



**Bienvenue
dans un monde
qui se construit autrement.**

L'univers de la construction se transforme. SMABTP adapte ses solutions d'assurance pour mieux vous accompagner. Avançons ensemble.

Notre métier : assurer le vôtre.

www.groupe-sma.fr

SMABTP – Société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics.
Société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances
RCS PARIS 775 684 764 – 8 rue Louis Armand – CS 71201 – 75738 PARIS CEDEX 15



SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

**1^{er} assureur
de la construction**

LEVÉE DE FOND EN COURS POUR LA START-UP LEAKMITED

Leakmited, start-up spécialisée dans la localisation des fuites d'eau assistée par l'intelligence artificielle (IA), souhaite continuer son développement par une levée de fond à hauteur d'1 M€. Aujourd'hui la moitié de la somme attendue est acquise par la contribution d'un Business Angel de renom. La levée de fonds se poursuit par le biais d'une campagne de crowdfunding Wiseed, ouverte à tout investisseur sensible au projet. Fondée en 2019, Leakmited développe une technologie dont l'algorithme permet d'isoler le périmètre du réseau le plus impacté par des fuites, réduisant ainsi le temps et les coûts dédiés à leur recherche.

→ Soutien de nouveaux investisseurs

Cette innovation s'appuie sur la combinaison de données du réseau d'eau et de données environnementales issues d'imageries satellites. Ces critères traités par l'IA produisent une centaine de variables permettant de décrire la complexité de la détection des fuites explorées et de guider leur localisation.

La jeune pousse a validé sa solution auprès d'une quinzaine de gestionnaires de réseaux privés et publics européens. Aujourd'hui, elle accélère son développement commercial en France et à l'international et mise sur le soutien de nouveaux investisseurs. Une partie des nouveaux fonds sera consacrée à mener des tests pilotes dans les pays en voie de développement, pour qui la préservation des ressources en eau est un enjeu majeur.



L'intelligence artificielle au service de la localisation des fuites d'eau.

TROIS MARCHÉS SUR TROIS CONTINENTS POUR EGIS



70 % des habitants de la métropole de Montpellier auront un accès rapide aux nouvelles lignes de bus.

L'actualité du groupe Egis se déploie en Afrique du Nord, en Amérique du Sud et en Europe et plus particulièrement en France. Le groupe présent dans 120 pays vient de remporter la maîtrise d'œuvre de trois nouvelles lignes de Bus à Haut à Niveau de Service pour le réseau de transports urbains de la Métropole de Montpellier. Associé à l'agence d'architecture LA/BA, ce projet s'inscrit dans une opération d'aménagement des espaces publics afin de mieux intégrer mobilités douces (piétons, vélos), transports collectifs puis, de façon plus contrainte, l'automobile. Au total, ce sont 57 km de nouvelles lignes de transport public et une centaine de stations qui vont être réalisés. Les bus 100 % électriques rouleront sur des voies dédiées pour des temps de parcours réduits et la priorité leur sera donnée aux carrefours. Les plages horaires seront élargies par rapport aux lignes actuelles et une information en temps réel sera donnée aux voyageurs.

Ce réseau sera mis en service au deuxième semestre 2025.

→ Ligne à grande vitesse au Maroc

Au Maroc, Egis va participer au développement d'un second réseau de lignes de train à grande vitesse. L'Office national des chemins de fer du Maroc (ONCF) a ainsi confié à Egis l'assistance à maîtrise d'ouvrage du contrôle extérieur de la ligne Kenitra-Marrakech d'une longueur de 430 km. La réalisation des études dans un laps de temps court mais aussi l'optimisation globale et cohérente du réseau telle qu'elle est attendue, rend ce

contrat complexe. Par ailleurs, le tronçon Ain Sebaa-Nouaceur qui inclut le contournement du hub de Casablanca, nécessite de prévoir dans les études le quadruplement de 60 km de voies, avec un trafic très dense en milieu urbain très contraint. Un défi pour Egis et les parties prenantes de l'ONCF (l'ingénierie, l'exploitation, le commercial, les essais, ...) ainsi que pour les bureaux d'études. Egis a déjà réalisé la maîtrise d'œuvre intégrée des voies entre 2010 et 2018, pour la première Ligne à grande vitesse (LGV) du Maroc, entre Tanger et Kenitra soit 200 km. Le projet LGV vise à doter le pays à horizon 2030 de 1 500 km de lignes ferroviaires à grande vitesse.

→ Éco-comparateur des émissions de gaz à effet de serre, au Pérou

Développé par Egis, l'éco-comparateur Variways® permet d'évaluer l'impact carbone d'une infrastructure routière lors des phases de construction et d'explo-

itation. Pour la construction d'une autoroute qui reliera Lima à la région de Junin, dans le centre du Pérou, "Provias Nacional", organisme national dédié aux infrastructures routières, va utiliser cet outil d'aide à la décision. La route de 135 km qui bénéficiera de l'éco-comparateur traverse la cordillère des Andes et nécessite la construction de nombreux tunnels et viaducs. Pour cette recherche de l'optimum du carbone, l'aspect construction (terrassment, chaussées, équipements linéaires, ouvrages d'art courants, assainissement, viaducs et tunnels) mais aussi exploitation (circulation de tous types de véhicules, vitesse de circulation) sont pris en compte.

Les experts d'Egis apportent ainsi une approche comparative de plusieurs solutions de passage et peuvent mixer des combinaisons de solutions qui engendrent le moins d'émissions de gaz à effet de serre. ■



À l'horizon 2030, il y aura au Maroc 1 500 km de lignes ferroviaires à grande vitesse.

INNOVER POUR MIEUX ANALYSER LES FLUX DE VOYAGEURS



© SOPHIE LE RENARD

Pour analyser les flux de voyageurs dans les transports publics, Alyce utilise l'IA mais aussi les enquêtes de terrain.

« Depuis 20 ans, la société Alyce accomplit des comptages dans les transports, sur les routes ou dans le cadre "d'enquêtes ménage-déplacement". Ainsi, à l'échelle d'une agglomération, des interviews sont réalisées au domicile de 2 ou 3 % de la population. L'ensemble de ces mesures de mobilité sont pour les collectivités locales, exploitants autoroutiers, ou sociétés de transporteurs, une matière première essentielle pour la gestion et l'aménagement futur d'infrastructures de transport. » explique Ismaël Hachem, fondateur et dirigeant de cette entreprise qui a été contrainte à l'innovation par l'arrivée dans ce secteur, du big data et de l'Intelligence artificielle (IA). Après un investissement de 4,5 M€, cette PME de 70 personnes présente dans le monde entier, vient de créer un nouveau pôle dédié aux transports en communs afin d'étudier les flux et les comportements des voyageurs. Les données recueillies sont particulièrement prégnantes, après la période de pandémie entraînant des changements de comportements et des incertitudes quant à la fréquentation des métros, bus et autres tramways.

Si les solutions innovantes déployées utilisent des hautes technologies (algo-

ritmes d'analyse d'image, intelligence artificielle, application mobile, fusion de données ...) Alyce n'a pourtant pas abandonné les enquêtes de terrain. « Le big data ne permet pas des comptages fiables à 100 % et n'est pas efficace à l'échelle micro économique. Aussi nous avons donc inventé un système qui allie les deux types de mesures. Cela nous a aussi permis de diviser par 2 ou 3 la facture de nos clients. » note Ismaël Hachem.

→ Niveaux de précision de 95 %

Pour connaître la fréquentation d'une station, d'une ligne ou d'un réseau de transport public, l'entreprise a mis en place un outil d'analyse des flux de voyageurs par traitement vidéo, en conformité avec le Règlement général sur la protection des données (RGPD). Grâce à l'IA et des caméras embarquées, des comptages sont réalisés avec « des niveaux de précision de l'ordre de 95 %, » selon la communication de l'entreprise. Prochainement 1 200 caméras vont être posées à chaque porte des trains dans le RER A, permettant de comptabiliser chaque entrée et sortie.

Pour faciliter la lecture et l'exploitation des données provenant de sources multiples (enquêtes, comptages, véhicules

connectés), une plateforme online de datavisualisation a aussi été créée. Cette application permet de collecter et de centraliser les données mobilité en un seul et même outil en ligne sécurisé.

→ Application mobile

Pour éviter les "enquêtes ménage-déplacement" aux coûts élevés, une application mobile a été développée. De larges panels de personnes (avec leur accord) voient leurs déplacements enregistrés et analysés. Et enfin, une autre innovation concerne le flux routier. Avec "Observer by Alyce" des smart box munies de capteurs de trafic et de qualité de l'air, sont mises en place aux points d'entrée et de sortie des villes. Ces boîtiers autonomes comptent et catégorisent les véhicules via la technologie du *deep learning* et apportent ainsi des mesures précises sur le trafic (vitesse, temps de parcours, embouteillages, part des poids lourds...). L'ensemble de ces données permet de connaître précisément les comportements des usagers et d'apporter des éléments d'analyse. Ce sont des aides à la décision pour, par exemple, la mise en place de zone à faible émission, la pérennisation des pistes cyclables ou le développement de l'offre de transports alternatifs. ■

JCB DÉVOILE UN RAVITAILLEUR À HYDROGÈNE MOBILE

JCB le groupe anglais spécialisé dans la construction d'engins notamment destinés au BTP vient d'annoncer avoir mis au point un ravitailleur à hydrogène mobile. En effet, l'entreprise a déjà produit de nombreux véhicules de chantier fonctionnant à l'hydrogène et a investi 100 millions de livres sterling pour que ce type de moteur soit performant. La ravitailleur vient donc faciliter l'approvisionnement des différentes machines directement sur site. « Nombreux sont ceux qui ont demandé comment ravitailler des machines alimentées à l'hydrogène. Aujourd'hui, nous avons une réponse (...) l'hydrogène est délivré grâce à une cuve mobile qui alimente les engins directement sur le chantier. » a expliqué Lord Bamford, président de JCB.

INNOVATION POUR DONNER LA PRIORITÉ AUX TRANSPORTS EN COMMUN

La groupe Lacroix a développé un système de priorité aux intersections appelé PrioV2X. Il permet d'optimiser le temps de parcours des bus, grâce à une régulation dynamique des intersections qui maximise le passage au vert aux carrefours à feux. Grâce à des modules embarqués dans chaque bus et d'autres installés aux carrefours, la technologie utilisée permet une communication bidirectionnelle en temps réel. Des messages peuvent ainsi être diffusés pour améliorer la sécurité des usagers (notifications d'accidents, indications de zones de travaux, aide au franchissement des intersections...). En complément, un procédé communique des informations sur les véhicules d'urgence, la présence de piétons ou cyclistes, ou encore l'éclairage aux arrêts de bus et aux intersections.

DES REVÊTEMENTS ADAPTÉS AUX ESPACES URBAINS SANS VOITURE

Colas a mis au point Colstab Mineralith et Urbalith, des revêtements adaptés aux zones à faible circulation (trafic léger et occasionnel), aux voies douces (pistes cyclables et trottoirs), et aux zones paysagères et piétonnes. Ces surfaces, minérales et perméables selon les besoins, engendrent 2,5 fois moins d'émissions de gaz à effet de serre par rapport à une solution traditionnelle en sable stabilisé au ciment. Urbalith est issu du mélange à froid de granulats avec un liant innovant minéral et transparent.

→ Lutter contre les îlots de chaleur

L'absence de joint de dilatation lui confère un caractère esthétique facilitant son intégration en sites classés ou sites architecturaux. Vérifié périodiquement par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), celui-ci peut être appliqué en Zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF) et zones Natura 2000. Ces revêtements sont des solutions pour lutter contre les îlots de chaleur en ville. Ils sont aussi installés dans les cours d'école comme le lycée Nevers à Montpellier ou lors d'aménagement d'espaces publics comme sur l'esplanade du Peyrou, dans cette métropole d'Occitanie.

À Aix-en-Provence, Urbalith recouvre les trottoirs et autres parkings, dans l'écoquartier de la Duranne.



Le revêtement Urbalith est adapté aux cours d'école.

DIKWE, LA PREMIÈRE DIGUE PORTUAIRE PRODUCTRICE D'ÉNERGIE



Le prototype Dikwe sur le site d'essais en rade de Brest.

Comment protéger les infrastructures portuaires et littorales des assauts de la houle tout en produisant de l'électricité ? C'est tout l'enjeu du projet Dikwe développé dans le cadre du projet national Énergies marines côtières et portuaires, dit Emacop et piloté par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. Ce projet a donné lieu à la réalisation d'un prototype de digue houlomotrice productrice d'énergie, situé à Brest dans le bassin profond à houle de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer). La Bretagne semble être le territoire idéal pour l'implantation de ce type d'ouvrage. En effet, une étude menée par France énergie marine et le Cerema de septembre 2021 à avril 2022, a identifié vingt ports dans le Finistère et le Morbihan, qui pourraient bénéficier de cette technologie.

Les premiers résultats issus de tests réalisés en temps réel ont été présentés en septembre dernier, par les différents acteurs du projet. En effet, le groupe Legendre, en partenariat avec Geps Techno et l'Ifremer avec le soutien de l'Ademe et les Régions Bretagne et Pays de la Loire, a travaillé près de deux ans sur ce projet de digue portuaire capable de produire de l'énergie.

→ Convertir la force de la houle en électricité

Le principe consiste à équiper une digue de protection du littoral d'un système houlomoteur avec volet oscillant. Actionnée par les vagues, cette installation de 25 tonnes, mesurant près de 4,5 m de haut et de large pour 6 m de profondeur, permet ainsi de convertir la force de la houle en électricité, produisant 10 kW. Des capteurs mesurent les vagues, la production d'énergie et la résistance de

la structure. La prochaine étape du projet consistera à renouveler une phase de tests sur un prototype quatre fois plus grand. Avec près de 20 m de large et de haut, pour une production de l'ordre de 1 MW, cet ouvrage devrait permettre de préciser les performances du procédé. La construction du prototype à taille réelle est envisagée en 2023 pour une mise à l'eau en 2024, sur un site en Bretagne qui reste à définir. En effet, des obstacles sont à lever. « Nous souhaitons nous associer au marché de rénovation des digues existantes. Pour cela, il faut lever les obstacles juridiques, car ce n'est pas simple de caractériser un objet ayant deux fonctions. La solution n'est pas toute prête, il faut faire appel à la fois au code maritime et au code de l'énergie, » a expliqué Quentin Henry, le responsable de ce projet pour le groupe Legendre. ■

UNE TECHNOLOGIE LED SOLAIRE ET TRADITIONNELLE POUR RÉDUIRE LES FACTURES D'ÉLECTRICITÉ

La société HP Proled, fabricant d'éclairage basé à Mulhouse, a développé une nouvelle technologie LED pour les éclairages extérieurs. Grâce à un procédé hybride alliant énergie solaire et traditionnelle, cette innovation a pour ambition de réduire de 90% la consommation d'énergie. Les panneaux solaires et batteries intégrées sur les luminaires permettent

à l'éclairage de se recharger le jour et d'éclairer la nuit. Lorsque la météo est défavorable, la batterie peut offrir une autonomie de 3 à 7 jours. Mais si le manque de soleil se prolonge, le luminaire est alors raccordé au réseau d'énergie. Le cycle de vie des luminaires a été pensé pour que chaque pièce soit recyclable et puisse être remplacée. Les luminaires

sont, quant à eux, modulables à l'infini. Destinés plus particulièrement aux collectivités locales et aux industries du Grand Est, ces nouveaux modèles de luminaires LED peuvent être une solution pour plus de sobriété énergétique. Même s'ils représentent un investissement important, ces modes d'éclairage LED « s'amortissent entre 7 et 10 ans, » assure HP Proled. ■



Nos expertises

- Essais et analyses en laboratoires
- Ingénierie de l'existant : durabilité des structures et durabilité des matériaux
- Assistance technique en réparation et traitement des bétons
- Assistance technique et conseil en matériaux durables et béton bas carbone
- Valorisation et traitement des déchets, sédiments et sous-produits industriels

Laboratoire & Ingénierie des matériaux





AGENDA

FORMATIONS

Nous invitons les lecteurs à vérifier par internet que les formations annoncés dans cette rubrique sont maintenus, à quelle date et dans quelles conditions (en présentiel et/ou à distance).

• 6 ET 7 FÉVRIER

Assimiler l'ingénierie financière du projet

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

• 7 FÉVRIER

Les aspects juridiques du BIM

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

• 5 ET 6 AVRIL

La fabrication de la maquette numérique et les outils du BIM

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

• 15 AU 17 MAI

Concevoir la modélisation des déplacements

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

• 6 AU 9 JUIN

Concevoir, dimensionner et assurer le suivi des chaussées aéronautiques

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

• 26 ET 27 JUIN

Contribuer à la prévention et au règlement des litiges

Lieu : Paris

<https://formation-continue.enpc.fr>

NOMINATIONS

AGENCE DES ESPACES VERTS DE LA RÉGION ÎLE-DE-FRANCE

Sophie Deschiens, a été élue Présidente de l'agence des espaces verts de la Région Île-de-France. Elle prend la suite d'Anne Cabrit.

EGIS

Egis a nommé Frédérique Berthier-Raymond Directrice juridique et compliance du groupe. À ce titre, elle intègre le comité exécutif.

UNION FRANÇAISE DE L'ÉLECTRICITÉ

Cécile George est devenue déléguée générale de l'Union française de l'électricité (UFE) depuis le 15 novembre 2022. Elle remplace Christophe Leininger.

UNION NATIONALE DES ENTREPRISES DU PAYSAGE

Hervé Gastaud est le nouveau délégué général de l'Union nationale des entreprises du paysage (UNEP). Il assurera la direction exécutive de l'organisation représentative des entreprises du paysage aux côtés de Laurent Bizot, Président de l'Unep et de son bureau. Il remplace à cette fonction Ghislaine de la Bretesche.

CERIB

LES PISTES POUR RÉDUIRE L'EMPREINTE CARBONE DES SYSTÈMES CONSTRUCTIFS EN BÉTON

Les enjeux environnementaux et l'évolution de la réglementation, notamment la RE 2020, impliquent de décarboner fortement les ouvrages et les systèmes constructifs mis en œuvre. Concernant les bétons coulés en place et les produits en béton préfabriqués en usine, l'utilisation de plus grandes quantités d'additions minérales dans les liants ou dans les ciments à plus faible teneur en clinker apparaît comme une voie essentielle et prometteuse pour réduire l'impact CO₂ des solutions constructives en béton. Patrick Rougeau, directeur de la direction "matériaux et économie circulaire" du Cerib, fait le point sur ce que seront les bétons de demain. **Entretien avec Patrick Rougeau, directeur de la direction "matériaux et économie circulaire" du Cerib.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON

1 - Patrick Rougeau, directeur de la direction "matériaux et économie circulaire" du Cerib.



Quelles sont les évolutions à attendre dans le futur en ce qui concerne la décarbonation des systèmes constructifs en béton ?

Tout d'abord, il convient de rappeler que la diminution de l'empreinte carbone des systèmes constructifs en béton quels qu'ils soient doit être appréhendée de manière globale, en considérant leur apport à l'échelle de l'unité fonctionnelle en lien avec l'ouvrage.

Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des voies d'opti-

misation à disposition des concepteurs :

- L'optimisation du dimensionnement des structures pour diminuer autant que faire se peut les quantités de matériau (béton, aciers...);
- L'optimisation des émissions carbone de chaque partie du système constructif : béton, aciers...;
- L'apport des process industriels qui permettent de valoriser au mieux le potentiel des matériaux ;
- Le recours à des solutions matériaux mixtes, par exemple béton-bois.

FIGURE 1 © DR - FIGURE 2 © CERIB - FIGURE 3 © MARC MONTAGNON



Sur le matériau lui-même, quelles sont selon vous les voies de progrès possible pour la filière béton ?

Les principales évolutions à attendre concernent très certainement l'essor, dans un futur proche, des bétons décarbonés qui conduisent à une empreinte CO₂ plus faible que ceux d'aujourd'hui. Il s'agit là d'un enjeu très important pour la filière et au-delà pour tout le secteur, puisque le béton est très largement utilisé partout compte tenu de ses excellentes performances intrinsèques (comportement mécanique, durabilité, résistance au feu...), de sa disponibilité locale et de son positionnement économique.

Il est important de rappeler que la filière dispose déjà de plusieurs solutions à faible impact carbone, dont certaines sont utilisées depuis plusieurs décennies (cas des ciments CEM III avec laitiers de haut-fourneaux). Plus récemment l'industrie cimentière a mis sur le marché de nouveaux ciments décarbonés, dont les ciments CEM II C/M et CEM VI conformes à la norme NF EN 197-5.

Le développement des bétons décarbonés nécessite d'actionner plusieurs leviers :

- Poursuivre les développements pour optimiser encore la fabrication des clinkers dans les cimenteries, ainsi que les process de production des bétons et éléments préfabriqués en béton ;
- Mener une réflexion sur la disponibilité des ressources minérales nécessaires à la réalisation des liants décarbonés ;
- Consolider l'acquisition des connaissances sur les propriétés des bétons réalisés à partir de ces nouveaux liants : comportement à l'état frais,

PATRICK ROUGEAU : PARCOURS

Patrick Rougeau est ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers (ENSI Poitiers), promotion 1991.

En 1994, il soutient une thèse auprès du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), financée par l'Andra, sur "l'utilisation des bétons pour la réalisation des barrières ouvragées destinées aux centres de stockage de déchets radioactifs".

Il rejoint ensuite le Cebtp entre 1994 et 1997 avant d'intégrer le Cerib en 1997.

En 2021, il a passé son Habilitation à Diriger des Recherches (HDR).

Depuis 2016, Patrick Rougeau est directeur de la direction "matériaux et économie circulaire" du Cerib (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton).

Il anime le groupe d'experts "Solutions Bétons Bas Carbone (GE SBC)", rattaché à la commission française des bétons Afnor P18B "Béton".

durcissement, comportement mécanique, durabilité... ;

- Faire évoluer très significativement le contexte normatif de la filière béton pour bénéficier pleinement de ces innovations.

2- La centrale à béton du Cerib.

3- Malaxage d'un béton décarboné - liant Lowcarbottys®.

4- Essai de flexion sur un voussoir pour le Grand Paris Express.

5- Caractérisation d'une matrice cimentaire constituée d'un liant décarboné à l'aide d'un diffractomètre des rayons X.

Aujourd'hui et sur le court terme, l'enjeu est de pouvoir mettre sur le marché et d'utiliser des solutions cimentaires mettant en œuvre moins de clinker, et basées sur une diminution de l'empreinte carbone du clinker proprement dit, en améliorant le process de fabrication en cimenterie. Sur un horizon à plus long terme (15-20 ans), des clinkers à très faible empreinte carbone devraient voir le jour. En effet, l'industrie cimentière mène des recherches sur le captage de CO₂ des fumées des cimenteries émises lors de la décarbonation du calcaire utilisé pour la production de clinker.

Plusieurs voies sont étudiées : soit capter le CO₂ puis le transformer en un autre produit présentant un intérêt pour l'industrie, soit le stocker en profondeur dans des couches géologiques. Des expérimentations dans ce domaine sont déjà planifiées.

Mais, dans l'immédiat, l'enjeu principal est d'utiliser les ressources et produits qui sont déjà à disposition, en l'occur-

rence les additions minérales parce que ce sont elles qui permettent aujourd'hui de diminuer la quantité de clinker majoritairement à l'origine du CO₂.

Quelles sont les principales ressources minérales à considérer pour les liants décarbonés ?

L'analyse des ressources en constituants disponibles à ce jour et l'anticipation des besoins futurs sont des éléments clés. Ces questions constituaient le sujet principal de la journée technique organisée conjointement par la Sim (Société de l'Industrie Minérale) et le Cerib qui s'est tenue le 20 septembre dernier. À cette occasion, nous avons présenté notre rapport (téléchargeable depuis notre site internet) réalisé avec les fournisseurs de ciments et d'additions minérales et publié en septembre 2022. Ce rapport recense de façon très complète les ressources minérales entrant dans la fabrication des liants des bétons décarbonés, tant en ce qui concerne leur disponibilité que les perspectives d'évolution et les innovations à venir.

Pour faire des systèmes constructifs en béton décarbonés, il faut soit diminuer la quantité de béton en optimisant le dimensionnement des structures, soit utiliser des liants encore plus décarbonés, ou faire les deux en même temps. Quand on parle de "liant" dans la filière béton, cela concerne, en premier lieu, le ciment. Il existe un large panel de ciments utilisables en France.

Des avancées importantes ont été réalisées par les cimentiers qui proposent sur le marché des ciments à plus faible empreinte carbone en s'appuyant sur l'utilisation de constituants comme le calcaire broyé, les laitiers de hauts-fourneaux, les argiles calcinées et d'autres.

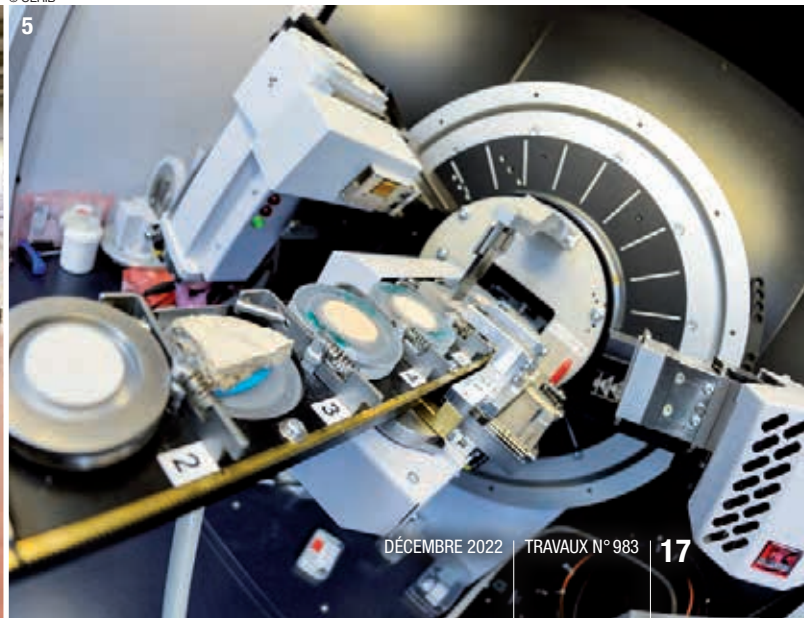
© CERIB

4



© CERIB

5



Le terme "liant" recouvre aussi l'utilisation de mélanges de ciment et d'additions minérales réalisés dans les malaxeurs au moment de la fabrication du matériau. Ces additions minérales sont les mêmes que celles citées précédemment pour les ciments. Elles disposent elles aussi de normes complètes et robustes.

Les concepteurs de béton ont ainsi la possibilité, soit de se procurer des ciments déjà mélangés avec du clinker et une ou plusieurs additions minérales - on parle alors pour ces dernières de "constituants" du ciment - soit de s'approvisionner en ciment et en additions minérales et de réaliser eux-mêmes le mélange en centrale à béton.

Il existe deux types d'additions minérales : celles issues essentiellement des carrières et pour lesquelles il existe un process dédié, et celles qui correspondent à des co-produits industriels. Les additions minérales du premier type sont d'origine calcaire, siliceuse ou argileuse tel que le métakaolin. Les additions minérales du second type sont les laitiers de haut-fourneau, les cendres volantes et les fumées de silice. Toutes ces ressources présentent un très grand intérêt pour les bétons de demain parce qu'elles permettent de diminuer l'empreinte carbone des liants et donc des bétons. Elles présentent des propriétés techniques différentes les unes des autres de même que leur disponibilité est variable. Les additions correspondant à des co-produits industriels dépendent de l'évolution du marché relatif à l'industrie amont : l'acier, par exemple, dans le cas du laitier de haut-fourneau, le contexte économique et géopolitique lié aux consommations d'énergie dans le cas des cendres volantes co-produites par les centrales à charbon.

LE CERIB EN BREF

Le Cerib (Centre d'Études et de Recherche de l'Industrie du Béton) est un Centre Technique Industriel (CTI) basé à Épernon, en Eure-et-Loir. Sa création remonte au 5 janvier 1967, conjointement par le ministre chargé de l'Industrie et par le ministre chargé de l'Économie et des Finances, à la demande de la Fédération de l'Industrie du Béton (FIB).

Le Cerib a pour mission de faire progresser et de déployer les connaissances scientifiques sur les matériaux, les produits, les ouvrages et les procédés de fabrication afin de répondre aux besoins des industriels et de l'ensemble des acteurs concernés, et aux enjeux nationaux et internationaux d'aujourd'hui et de demain.

Avec 180 collaborateurs et trois implantations (Épernon, Lyon, Rennes), le Cerib exerce son activité dans toute la France, entre essais et évaluations des produits et matériaux, études et recherches, normalisation et certification, appui technique, transfert de connaissances. Il dispose d'un centre de formation.

En raison du besoin d'utiliser des additions minérales qui s'accroît et de l'évolution de la disponibilité pour certaines d'entre-elles, il est nécessaire de s'interroger sur le développement de nouvelles ressources. Il faut ainsi s'intéresser à d'autres co-produits industriels potentiellement utilisables dans les bétons en tant que liant. C'est le cas par exemple des laitiers d'aciérie, des cendres de biomasse et des poudres de verre.

Les additions minérales qui ne correspondent pas à des co-produits industriels et qui disposent d'un process dédié présentent un intérêt fort. Elles ne sont pas dépendantes d'une industrie amont et en général elles sont issues de ressources minérales qui se trouvent en grande quantité sur le territoire. C'est le cas pour les additions calcaires qui sont des constituants particulièrement intéressants pour les bétons décarbonés. Les roches calcaires sont présentes en très grande quantité

en France et le process consistant à broyer une roche est très peu émissif en carbone.

On trouve également en France, beaucoup de gisements d'argiles qui associés à un process de calcination conduisent à d'excellents produits. Il existe aussi dans le Massif Central de grandes quantités de pouzzolanes naturelles qui pourraient très vraisemblablement être plus utilisées.

Quel est l'intérêt des pouzzolanes naturelles ?

L'utilisation des pouzzolanes naturelles volcaniques dans les matériaux cimentaires est connue depuis l'antiquité. Les romains les utilisaient déjà pour construire leurs édifices. Ces constituants ont déjà subi un traitement thermique en quelque sorte puisqu'il s'agit de roches volcaniques. Leur minéralogie fait qu'elles conduisent à la formation d'hydrates proches de ceux obtenus avec le clinker. Elles pré-

sentent de ce fait un réel intérêt pour les bétons d'autant qu'on dispose en France d'un gisement très important dans la chaîne dite "des puys" dont le gisement est estimé à 700 millions de tonnes. Il s'agit d'un ensemble d'environ 80 volcans s'étirant sur plus de 30 km sur le plateau des Dômes dans le nord du Massif central.

La difficulté d'exploiter ces ressources tient au fait qu'elles sont situées dans le parc naturel régional des Volcans d'Auvergne, inscrit au patrimoine mondial de l'Unesco depuis 2018 en tant que "haut lieu tectonique". Ce classement pourrait compliquer l'ouverture de toute nouvelle carrière. Il pourrait de ce fait compromettre les perspectives pour l'utilisation de ce matériau à moyen terme (après 2030). Néanmoins, cette ressource naturelle mériterait d'être considérée davantage.

Dans quelle direction le contexte normatif pourrait-il évoluer ?

Des évolutions doivent être apportées sur un horizon à court terme à la norme NF EN 206/CN destinées aux applications structurelles. Il est important en effet qu'elle intègre pleinement les innovations, en particulier celles concernant l'utilisation des additions minérales normalisées et les nouveaux liants alternatifs. Cela implique de reconsidérer et d'élargir les concepts actuels de la norme, sans diminuer bien entendu la robustesse des bétons structurels. C'est un point essentiel auquel l'ensemble de la filière béton est très attentif.

La commission de normalisation française AFNOR/P18B a pour cela mis en place un groupe d'experts "Solutions Bétons Bas Carbone" (GE SBC) chargé d'émettre des propositions pour faire évoluer la norme NF EN 206/CN sur



© CERIB

6



© MARC MONTAGNON

7

l'horizon de temps 2024-2025. Ce groupe, que j'anime, est composé de six Task Forces. La première s'intéresse aux liants et additions alternatifs (comme les cendres de biomasse et les laitiers d'aciérie cités précédemment) et à la manière de les relier au contexte normatif. La seconde mène une réflexion sur les indicateurs qui pourraient être utilisés pour les bétons décarbonés.

La troisième Task Force porte sur la valorisation des additions minérales dans le liant, les règles sur la formulation des bétons et les limites actuelles sur les sulfures des liants utilisés en précontrainte. La quatrième a pour mission d'élaborer une base de données sur les bétons décarbonés.

La cinquième Task Force concerne deux volets. Le premier correspond aux bétons destinés aux ouvrages provisoires (durées de vie inférieures à 10 ans) pour lesquels les dispositions actuelles de la norme NF EN 206/CN (durée de vie de 50 ou 100 ans) apparaissent surdimensionnées. Le second volet consiste à s'interroger sur les règles à adopter pour les bétons non structuraux. Enfin, une sixième Task Force a été créée très récemment. Elle est chargée des questions sur les solutions bas carbone en lien avec le dimensionnement des structures. Cette Task Force réunit des membres de la commission BNTRA qui pilote le complément national de l'Eurocode 2.

Aujourd'hui, la principale voie pour valider un béton destiné à une application structurelle est de vérifier que la formule de béton répond à un certain nombre de critères portant essentiellement sur les dosages minimaux en ciment ou en liant, avec la notion de liant dit "équivalent" et des ratios Eau/Liant équivalents à respecter. Dans cette approche pres-

À PROPOS DU GROUPE D'EXPERTS " SOLUTIONS BAS CARBONE "

Avec l'entrée en application de la RE 2020, programmée pour le 1^{er} janvier 2022, la filière béton se mobilise pour faire évoluer le contexte normatif. Dans ce cadre, la commission de normalisation Afnor/P18B a mis en place le Groupe d'Experts Solutions Bas Carbone ou GE SBC. Celui-ci réunit une soixantaine de participants : des organismes professionnels, des fournisseurs de constituants, des producteurs, des entreprises de BTP, des bureaux d'études, des industriels, des experts et des représentants des maîtres d'ouvrage. « Ce groupe d'experts Solutions Bas Carbone, mène une réflexion de fond pour faire évoluer le contexte normatif et ouvrir encore plus la porte aux bétons décarbonés. Il est indispensable aujourd'hui d'inclure dans les normes de la filière béton des procédures permettant de valider des innovations matériau. », précise Patrick Rougeau, directeur matériaux et économie circulaire du Cerib et animateur du GE SBC.

criptive, le liant équivalent est la somme du ciment et d'une partie des additions minérales seulement. Tout est dans le "une partie" : de ce fait, on ne valorise pas la totalité des additions minérales, ce qui conduit in fine à utiliser davantage de clinker. Ce concept datant des

années 90 était un progrès à l'époque et permet aujourd'hui de réaliser des bétons robustes et durables. Néanmoins, à l'aune des nouveaux enjeux liés à la transition écologique, il nécessite d'être reconsidéré, sans compromis bien sûr sur la qualité finale des bétons. Cette approche constitue la première voie et nous discutons des évolutions possibles qui la concernent.

La deuxième voie est plus récente et correspond à une approche dite performantielle. L'approche performantielle est aujourd'hui rattachée à la norme NF EN 206/CN via le Fascicule de Documentation FD P 18-480 qui vient de paraître. Elle consiste à considérer qu'il est possible de donner un degré de liberté plus important au formulateur de béton, sous réserve d'effectuer un certain nombre de vérifications des performances directement sur le matériau, d'où le terme approche performantielle. Toute une série d'essais, en lien avec le vieillissement accéléré, a été dévelop-

pée, vérifiée et consolidée au travers du projet national PerfDub.

Quelle pourrait être la troisième voie dans la norme NF EN 206/CN ?

Récemment abordée en commission de normalisation au sein du GE SBC, elle consiste à réaliser une validation des performances de liants (dont les caractéristiques vont au-delà des limites de la première voie en termes de diminution de la proportion de clinker) selon une approche performantielle, pour ensuite pouvoir utiliser ces liants dans les bétons en réalisant peu ou pas d'essais sur ces derniers.

Nous échangeons en ce moment même au sein du GE SBC pour évaluer les avantages et les inconvénients de cette voie afin de statuer sur la pertinence ou non de l'inclure dans la norme NF EN 206/CN.

Quels seraient les travaux de recherche à mener pour accompagner ces évolutions ?

Il faut des travaux de recherche pour améliorer la compréhension des mécanismes à l'œuvre dans les bétons à base de liants décarbonés et ainsi accompagner l'innovation technologique.

Pour ne citer que quelques-unes des thématiques à investiguer, il y a l'optimisation des squelettes granulaires gage de bonne compacité du béton, l'identification des bons couples liant/adjuvantation, la stabilité des hydrates formés, les déformations différées, l'adhérence des armatures...

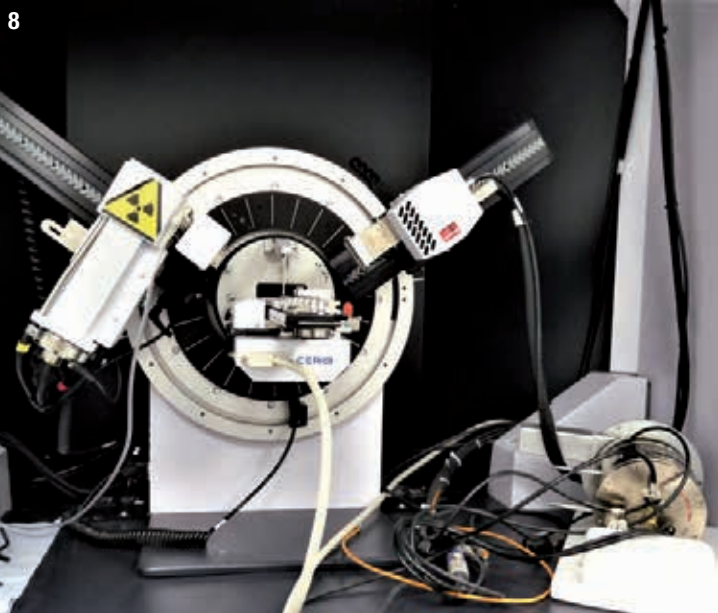
Les travaux que nous menons dans le cadre d'une chaire conjointe avec l'IMT d'Alès (Professeur Éric Garcia-Diaz) s'intéressent à ces questions à travers la réalisation de thèses, dont celle ▷

6 & 7- Le Microscope Électronique à Balayage (MEB) : un outil précieux pour la compréhension des mécanismes physico-chimiques.

8- Le diffractomètre à rayon X du Cerib.

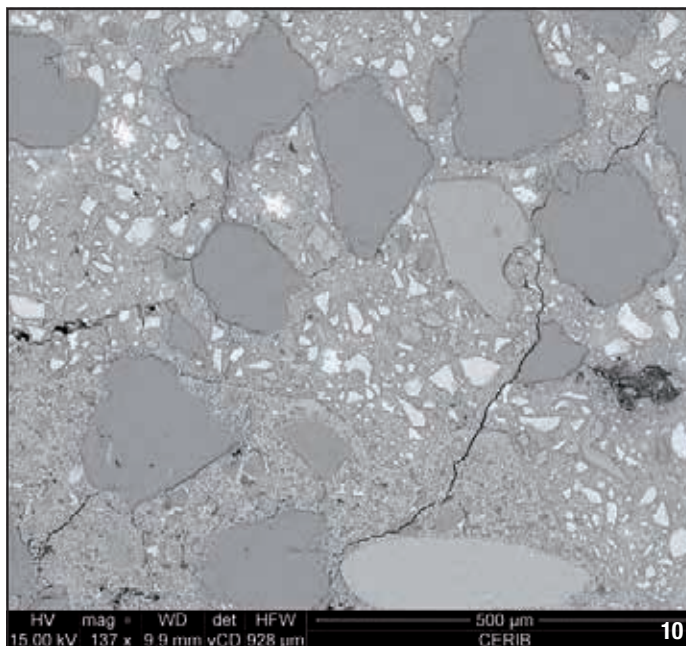
9- Plateforme de vieillissement des corps d'épreuve du Projet National PerfDuB.

© MARC MONTAGNON



© CERIB





© CERIB



© MARC MONTAGNON

de Lucas Mosser qui se soutiendra début 2023.

Elle porte à la fois sur le développement de nouveaux liants ternaires (un ciment et deux additions minérales) et sur l'optimisation de l'empilement granulaire des particules solides du matériau (sable, gravillons, ciment, additions minérales).

Un autre aspect concerne le durcissement des bétons décarbonés. Une illustration : lorsqu'on diminue la quantité de clinker dans un liant, on diminue l'empreinte CO₂, ce qui est bien pour l'impact environnemental, mais, en général, on diminue également la réactivité du liant et donc sa vitesse de durcissement. Pour certaines applications, cela peut constituer un frein qu'il est possible de compenser en utilisant des adjuvants tels que des accélérateurs de durcissement.

Quels sont les leviers techniques qui favorisent l'utilisation des liants décarbonés ?

Il y a plusieurs types de leviers : certains se situent au niveau du matériau, d'autres concernent le process. De mon point de vue, il est essentiel de ne pas négliger ce que peuvent apporter les process industriels.

Le traitement thermique est un bon exemple. L'apport de chaleur au béton permet d'accélérer fortement la résistance au très jeune âge. On pourrait craindre que les émissions de CO₂ qui résultent du traitement thermique soient rédhibitoires. Mais, lorsqu'on fait le bilan global à l'échelle du système constructif, le résultat est très pertinent du point de vue de l'empreinte carbone. La réduction de CO₂ liée à la moindre quantité de clinker compense très largement les faibles quantités de

CO₂ associées au process industriel. Le process est donc un levier très fort pour utiliser au mieux les liants bas carbone. Cela ouvre tout un pan de recherches sur l'optimisation des interactions matériaux/process. L'industrie a besoin d'optimiser encore ses process pour faire usage au mieux de ces liants décarbonés, d'où un dialogue et des actions conjointes nécessaires entre les acteurs de la recherche et ceux de l'industrie. C'est à ce niveau que se situe l'intérêt des projets nationaux qui rassemblent des acteurs du monde industriel et du monde académique ainsi que des interlocuteurs qui vont assurer le relai avec les normes. De mon point de vue, on devrait encourager beaucoup plus, en France, les projets nationaux. Ils sont aujourd'hui beaucoup moins bien financés que dans le passé et c'est tout à fait regrettable. Les projets natio-

naux sont l'une des solutions pour faire avancer les connaissances, l'utilisation des nouveaux bétons et les normes. J'ai cité précédemment le projet national PerfDuB sans lequel l'insertion de l'approche performantielle dans la norme NF EN 206/CN n'aurait pas vu le jour et sans laquelle il ne serait pas possible de réaliser certains bétons décarbonés.

En termes de contribution majeure aux connaissances et textes normatifs, il faut citer également les projets nationaux Recybéton et Fastcarb qui concernent les granulats recyclés, bien qu'il n'y ait pas de lien direct entre la réduction des émissions de CO₂ du béton et les granulats recyclés, lorsque ces derniers ne bénéficient pas de technologie tel que le captage de CO₂ étudié par Fastarb. L'intérêt premier des granulats recyclés se situe davantage

© PIERRE & TERRITOIRES

12



© CERIB

13



sur le volet de l'économie circulaire et la préservation des ressources.

Des projets de construction en cours font-ils déjà appel aux innovations que vous évoquiez précédemment ?

Oui, dans le domaine des travaux publics, les voussoirs réalisés par Vinci à partir de béton Exegy® ultra-bas carbone et destinés aux infrastructures du Grand Paris Express constituent une avancée de premier ordre. Cette réalisation est emblématique en raison de l'importance de l'ouvrage, mais également en raison du fait qu'elle s'appuie sur une démarche globale d'innovation à l'échelle du système constructif.

Les innovations concernant les voussoirs du Grand Paris Express portent sur le matériau et l'utilisation de fibres métalliques en remplacement des armatures traditionnelles. Sur ce dernier volet, l'intérêt est d'utiliser moins d'acier pour un comportement identique : la démarche est donc vertueuse du point de vue des émissions de carbone, elle permet par ailleurs la réduction des coûts.

Au Cerib, nous contribuons également au développement de telles solutions en conduisant des démarches selon trois axes : une approche matériau pour optimiser les formulations de bétons à base de fibres métalliques afin de chercher les bons dosages et faire en sorte que le béton conserve une ouvrabilité compatible avec le process industriel. Ce travail s'accompagne de caractérisations des performances du béton fibré avec vérification de la ductilité et de la flexion à l'aide d'outils appropriés. Il s'agit également de disposer de méthodologies pour passer de l'éprouvette de béton (prismes de 15 cm x 15 cm x 60 cm) au comportement du

LE BÉTON EN FRANCE

La production de béton en France se répartit en trois catégories d'application :

- **Le béton prêt à l'emploi dont la production en 2019 s'est élevée à 40 millions de m³ (soit environ 96 millions de t) dans plus de 1 900 unités de production, pour un chiffre d'affaires de 4,4 milliards d'euros.**
- **Les produits en béton dont la production en 2020 s'est élevée à 21 millions de t (béton et acier compris) dans 722 sites de production pour un chiffre d'affaires de 2,8 milliards d'euros.**
- **Les bétons réalisés dans les centrales de chantier dont la production est estimée à 8,2 millions de m³ soit environ 19 millions de t.**

(sources : Cerib, Snppe, Industrie du béton).

10- Observation à l'échelle de la dizaine de microns d'un liant décarboné hydraté.

11- Surface polie d'un béton à base d'un liant ternaire bas carbone (clinker, argile calcinée, addition calcaire).

12- Le démonstrateur Olympi de Pierre & Territoires Eure-et-Loir à Chartres.

13- Réalisation en usine d'un mur à coffrage intégré en béton décarboné.

14- Fabrication des corps d'épreuve du Projet National PerfDub.

15- Un mur à coffrage intégré en béton incluant du métakaolin flash.

voussoir proprement dit fabriqué en usine selon une approche statistique pour corroborer les résultats des essais et les intégrer à l'échelle du système constructif. De nombreux progrès ont été réalisés dans ce domaine.

Nous intervenons aussi pour caractériser le comportement mécanique des voussoirs à l'échelle 1 grâce à des presses de grande capacité qui appliquent des efforts mécaniques de plusieurs dizaines de tonnes sur les voussoirs. Cela nous permet de vérifier que les hypothèses et les conclusions sur les essais à échelle réduite sont bonnes. Le troisième volet concerne le comportement vis-à-vis de la sécurité incendie : il faut vérifier que les segments de tunnel, soumis à un feu normalisé et chargés, répondent aux exigences du cahier des charges en cas d'incendie.

D'autres réalisations peuvent-elles être citées ?

Oui, par exemple dans le domaine du bâtiment, le démonstrateur Olympi, à Chartres (Eure-et-Loir). C'est un projet d'écologie industrielle territoriale

en cours de construction. Il constitue notamment une vitrine des systèmes constructifs préfabriqués en béton. La démarche du promoteur immobilier Pierre & Territoire d'Eure-et-Loir (filiale du groupe Procivis) a été de s'inscrire d'emblée dans une logique vertueuse. Olympi, est un ensemble de 37 logements collectifs sous forme d'une promotion immobilière classique d'accès à la propriété. Cette opération pilote et duplicable pour mettre en lumière les meilleures pratiques et analyser les conditions de sa répliquabilité sur d'autres territoires, est estampillée BIM, économie circulaire et systèmes constructifs en béton décarbonés. Elle ambitionne de démontrer sa capacité à mobiliser des acteurs locaux en circuit court et de traiter, en lien avec le numérique, les thèmes de l'économie circulaire : l'intégration de granulats de béton recyclés, l'utilisation de liants de béton décarbonés, la réalisation d'un chantier zéro déchet..., le tout pour maîtriser le bilan carbone en favorisant les démarches/produits de territoires. Le démonstrateur Olympi vise également à représenter une vitrine des atouts des Smart Systèmes en Béton, de l'ancrage territorial des industriels du béton, dans une logique de création de valeur locale. Son ambition est de démontrer que la conception optimisée des solutions préfabriquées en béton permet de répondre aux enjeux de la RE2020 et de l'économie circulaire, de mieux rationaliser la production, maîtriser le planning et les coûts, générer moins de déchets, de nuisances et de pénibilité, travailler sur un chantier propre et respecter des délais contraints.

Olympi fait d'ailleurs la connexion avec le projet national FastCarb, en cours d'achèvement. ▶

© CERIB

14



© MARC MONTAGNON

15



RAPPORT DU CERIB :

LES " RESSOURCES MINÉRALES POUR LES LIANTS DES BÉTONS DÉCARBONÉS : DISPONIBILITÉ, PERSPECTIVES ET INNOVATIONS "

Ce rapport présente un bilan de la disponibilité à court terme des additions minérales et des constituants des ciments autres que le clinker ainsi que les perspectives d'évolution à moyen terme de ces matériaux. Il met en avant la diversité des solutions potentielles permettant de réduire l'impact environnemental du béton (téléchargeable sur le site du Cerib www.cerib.com).



© CERIB
16

Quels sont les objectifs du projet national FastCarb ?

Le projet national FastCarb est l'un des tout premiers projets dans lequel on s'intéresse au captage de CO₂ dès la fabrication du béton et de ses constituants. Il vise à démontrer qu'il est possible de capter le CO₂ émis par les fumées des cimenteries pour le réinjecter et le stabiliser dans les granulats recyclés.

Les granulats recyclés sont transportés sur la cimenterie. Une partie des fumées des cimenteries est dérivée et dirigée vers les granulats recyclés qui captent le CO₂.

Olympi, à Chartres, va précisément accueillir des escaliers préfabriqués en usine constitués d'un béton qui incorpore des granulats recyclés carbonatés. Ces granulats captent entre 10 et 40 kg de CO₂ par tonne selon les caractéristiques des granulats recyclés et le process de carbonatation.

La notion de démonstrateur que constitue une réalisation telle qu'Olympi est importante. Pour progresser vers les systèmes constructifs en béton de demain, il faut de la recherche, il faut s'intéresser au levier "process" en usine, il faut faire évoluer les normes,

16- Le Cerib a publié en septembre 2022 un rapport extrêmement complet sur "les ressources minérales pour les liants des bétons décarbonés : disponibilité, perspectives d'évolution et innovations".

17- Le siège du Cerib, dû à l'architecte Dominique Maunoury, est une véritable démonstration des possibilités esthétiques du béton préfabriqué.

18- EnerGé, bâtiment démonstrateur à énergie positive du Cerib conçu par l'architecte Yves Sémichon.

mais il faut aussi réaliser des opérations de démonstration. C'est essentiel de manière à associer tous les acteurs de la construction.

C'est une notion qui est désormais incorporée systématiquement dans les projets nationaux. Il s'agit de ne pas se limiter aux travaux de recherche et de prévoir la réalisation de prototypes ou d'applications à l'échelle 1. C'est le cas du projet PerfDuB qui a mis en place un programme de suivi du vieillissement de corps d'épreuve sur deux sites : le port de la Rochelle pour le milieu marin et la plateforme d'Épernon pour la carbonatation.

Les démonstrateurs permettent de franchir des étapes psychologiques, de démontrer et, ensuite, de dupliquer. C'est pour cette raison que le Cerib en synergie avec la Fib (Fédération de l'Industrie du Béton) accompagne ce type de réalisations. Nous nous situons sur les quatre niveaux : recherche appliquée au niveau du matériau et des systèmes constructifs, travaux applicatifs en usine et là nous nous intéressons au process industriel, accompagnement des travaux au niveau de la normalisation, réalisation d'opérations de démonstration.

En conclusion, quels sont selon vous les éléments clés pour faire évoluer le monde du béton ?

La filière béton dans son ensemble est déjà très fortement mobilisée pour faire évoluer ses solutions. Des innovations à tous les niveaux, constituants, matériaux, systèmes constructifs font l'objet de travaux et d'applications au sein des entreprises pour faire évoluer le monde de la construction. Il convient d'accompagner et d'accroître encore ces démarches en renforçant les liens qui existent entre trois domaines : la recherche, l'industrie et le contexte normatif. Les acteurs de ces trois domaines doivent échanger davantage. Enfin, le contexte normatif m'apparaît aujourd'hui comme un élément central sur lequel il faut jouer pour faire évoluer nos pratiques sur un court horizon de temps, c'est-à-dire 2 à 3 ans. Il est tout à fait essentiel d'inclure dans les normes de la filière béton des procédures permettant de valider des innovations matériau. Pour la profession, cela implique une évolution en profondeur de la manière de concevoir ses textes normatifs. C'est ce à quoi nous assistons aujourd'hui dans les commissions de normalisation. □

© MARC MONTAGNON

17



© MARC MONTAGNON

18





BTP BANQUE

GRUPE CREDIT COOPERATIF

C'est le métier
qui parle

LA BANQUE PROFESSIONNELLE DU BTP

www.btp-banque.fr



© ARGECO

ARGECO DÉVELOPPEMENT MÉTAKAOLIN FLASH : UNE ADDITION "VERTE" POUR LES BÉTONS À FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

ARGECO DÉVELOPPEMENT EST UNE SOCIÉTÉ FRANÇAISE QUI EXPLOITE ACTUELLEMENT À FUMEL (LOT-ET-GARONNE), DEPUIS SEPTEMBRE 2006, UNE PREMIÈRE UNITÉ DE PRODUCTION DE MÉTAKAOLIN FLASH. LE MÉTAKAOLIN FLASH EST UNE RESSOURCE QUASI-NATURELLE, PROCHE DE LA NATURE, CAR ACTIVÉE UNIQUEMENT VIA LA MODIFICATION PHYSIQUE PAR VOIE THERMIQUE D'UNE ARGILE KAOLINIQUE. GRÂCE À LA TECHNOLOGIE DE CALCINATION "FLASH" MISE AU POINT PAR LA SOCIÉTÉ DEMETER TECHNOLOGIES, ARGECO DÉVELOPPEMENT PROPOSE DES PRODUITS DESTINÉS AU BÉTON ET DES LIANTS HYDRAULIQUES ROUTIERS TECHNIQUEMENT PERFORMANTS ET EXTRÊMEMENT COMPÉTITIFS TANT AU NIVEAU ÉCOLOGIQUE QU'ÉCONOMIQUE. AVEC PHILIPPE HAUZA, DIRECTEUR À LA DIRECTION TECHNIQUE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT DE COLAS, PRÉSENTATION DE CE MATÉRIAU ENCORE UN PEU MÉCONNU MAIS QUI, EN FONCTION DE L'ÉVOLUTION "ENVIRONNEMENTALE" PRÉVISIBLE DES BÉTONS, EST APPELÉ À UN BEL AVENIR.

C'est en 2004 qu'une activité industrielle a repris dans la carrière du Brétou à Fumel, dans le Lot-et-Garonne, pour fabriquer le métakaolin flash. Cette carrière était historiquement déjà exploitée depuis 1910 pour extraire l'argile kaolinique

nécessaire à la fabrication de matériaux réfractaires et cela fait désormais près de vingt ans que, sous l'impulsion de l'entreprise Malet, Argeco Développement a vu le jour en s'installant sur ce site. Initialement, l'objectif de Malet et de ses partenaires était d'acquérir

1- L'argile sableuse kaolinique versicolore avant la mise en stock initiale.

une indépendance locale vis-à-vis de la fourniture de liants ou constituants pour le traitement des sols et/ou la formulation de béton : l'ingrédient trouvé sera le métakaolin flash.

La disponibilité du kaolin à Fumel, se comptant en millions de tonnes, rend

possible la production à grande échelle de ce matériau durable pour plusieurs dizaines d'années.

« Depuis juin 2015, Argeco Développement a rejoint Colas, indique Philippe Hauza, en l'occurrence Colas Territoire Sud-Est dont elle est une filiale, consolidant ainsi la volonté du groupe d'intégrer verticalement les bétons ainsi que les matériaux cimentaires, largement employés dans le cadre de ses activités aux infrastructures horizontales de tous types, le génie civil et le bâtiment. »

La kaolinite est un alumino-silicate qui se présente sous la forme de feuillets eux-mêmes constitués de couches

successives de tétraèdres d'oxygène entourant un atome de silicium ou d'aluminium et d'octaèdres formés par deux plans d'oxygènes-hydroxyles encadrant des atomes plus larges tels que : Al, Fe, Mg, Li, ...

Une fois prélevée directement sur site, cette ressource naturelle subit une

2- Philippe Hauza, directeur à la Direction technique Recherche et Développement de Colas.

cuisson à des températures comprises entre 600 et 800°C. Il se produit alors une déshydratation, puis une déshydroxylation (perte de groupements OH) de la kaolinite qui entraîne des modifications structurales (amorphisation par désorganisation de la structure du feuillet argileux). Ainsi, le kaolin auparavant cristallisé et non réactif devient du métakaolin amorphe et réactif.

Sa cuisson peut se dérouler en four rotatif (méthode classique) ou dans un four dit "flash".

L'usine installée à Fumel, unique en France par sa taille et par sa conception, permet cette calcination flash de

la kaolinite qui suit un cheminement en plusieurs étapes.

L'argile prélevée dans la carrière est d'abord préséchée dans un hangar. Ensuite, ces blocs d'argile de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur sont "émottés" pour que les plus gros agglomérats n'atteignent plus que quelques centimètres. Le produit est alors séché à 100-200°C (chaleur fatale récupérée du four), puis broyé pour que ces éléments atteignent un diamètre maximum de 200 à 300 µm (micromètre = 10⁻⁶ m).

Un sélecteur dynamique procède enfin à une coupure 0/100 µm - 100 µm-D. ▷



© DR 2

PHILIPPE HAUZA : PARCOURS

Philippe Hauza est titulaire d'un BTS de Géologie Appliquée de l'École Nationale Supérieure de Géologie (1992) ainsi que d'une maîtrise de sciences et techniques en géologie appliquée (1994) et d'un DESS de Géologie Appliquée de l'Université de Franche-Comté (1995).

Il commence sa carrière de géologue dans des entreprises de terrassement où il contribue, par la géotechnique et le contrôle qualité, aux grands travaux entre 1996 et 2001 : le périphérique Sud de Caen avec Valérian, la déviation de Nevers sur l'A77 avec Roland (groupe Eiffage), l'A104 Cergy-Roissy (Francilienne), le bouclage du contournement de Disneyland Paris, la déviation de Dompierre-sur-Besbre (03) ou la déviation de Hirson (02) toujours avec Roland, en tant que responsable technique de la région Île-de-France.

Il contribue ainsi à développer avec Roland Île-de-France la technique du traitement de sols en place notamment pour pallier le fait que la société ne disposait pas en Île-de-France de carrières, de centres d'enfouissements ou de centrales d'enrobage ou de blanc. Cette période correspond aussi à la réalisation de nombreuses plateformes logistiques dans toute l'Île-de-France dont la plus emblématique est celle du Carré Sénart dans la ville nouvelle de Melun-Sénart.

En 2001, il rejoint Screg (Groupe Colas) en tant que chef de l'unité "matériaux traités aux liants hydrauliques, géotechnique et granulats" au laboratoire central de l'entreprise à Magny-les-Hameaux. En 2003, le service ouvre la voie à la mutualisation des services techniques centraux à l'ensemble des marques et territoires du groupe Colas en France et à l'International, en même temps que les laboratoires centraux de Colas, Screg et Sacer de Magny-les-Hameaux, dans les Yvelines, deviennent le Campus Scientifique et Technique (CST) de Colas.

En 2007, il quitte la France pour rejoindre Colas à Madagascar, au moment où les grands chantiers miniers sont à leur apogée : construction de plusieurs grands barrages en terre, dont le plus imposant affiche une hauteur de plus de 40 m pour une longueur de 600 m, fondations profondes (106 km de longueur cumulée de pieux en béton armé), Génie Civil pour l'implantation de l'usine de traitement des minerais (plus de 450 000 m³ de bétons produits in situ en moins de 2 ans), terrassements, ouverture et développement de carrières.

À Madagascar, Philippe Hauza structure, forme et accompagne le service technique de Colas pour lui permettre de faire face à ces chantiers pharaoniques (mines de nickel et de cobalt de la société Sherritt, mine d'Ilménite de QMM à Fort Dauphin), ainsi qu'aux autres travaux plus conventionnels sur le territoire : entretien périodique curatif de plus de 200 km sur la RN2 reliant Tananarive (Antananarivo) à Tamatave (Toamasina) ainsi que 110 km sur la RN7 reliant Tananarive à Tuleria (Toliara). Il participe également à la rénovation des ports de Diego-Suarez (Antsiranana) et de Tamatave (Toamasina).

Tout s'arrête brutalement en 2009 lorsque le président en place Marc Ravalomanana est renversé par un coup d'état. Face à la très forte récession consécutive à cet événement, il rejoint l'île de La Réunion dans laquelle se préparait un projet de tram-train, rapidement abandonné et remplacé, suite à une décision politique, par ce qui deviendra la "Nouvelle Route du Littoral".

Compte-tenu des incertitudes et délais entourant cette possible réalisation, il saisit alors l'opportunité de revenir en métropole et rejoint en 2011 Sacer Paris-Nord-Est en tant que directeur technique.

En 2012, pour faire face à un fort ralentissement prévu des chantiers et, notamment, des chantiers routiers, les trois marques routières Sacer, Screg et Colas sont fusionnées à l'échelle de la France et Philippe Hauza est nommé en 2013 directeur technique adjoint de Colas Île-de-France - Normandie, la plus importante des filiales de Colas France en termes de chiffre d'affaires.

Enfin, en 2015, Philippe Hauza est nommé directeur technique à la Direction Technique Recherche et Développement du groupe Colas avec la charge, tout particulièrement, de développer INMS, société spécialisée dans la R&D, la fourniture et l'application d'aqua-liants (liants organo-minéraux), ainsi qu'Argeco Développement, producteur de métakaolin flash, acquis à 100% par Colas la même année.

Par ailleurs, Il préside depuis 2016 la commission de normalisation "Assises de Chaussées" du BNTRA, participe aux travaux de la CN Reconnaissances Amiante Avant Travaux (BNTRA) et de la CN P18B et P18C de l'AFNOR. Il est également en charge auprès de l'IDRRIM de l'animation du Groupe Spécialisé chargé d'instruire et délivrer les avis techniques pour les produits et procédés contenant des liants hydrauliques ou minéraux.



3

© ARGECCO

À l'image d'un aspirateur, un circuit sous dépression relié à un broyeur aspire le kaolin broyé 0/100 µm pour l'intégrer à la boucle de calcination. C'est à ce moment que la simple argile kaolinite non réactive, passant auprès d'une flamme durant quelques secondes seulement, est transformée en métakaolin, produit qui présente alors des propriétés réactives permettant son utilisation comme addition minérale dans les bétons.

« Le grand intérêt du métakaolin flash pour la confection de bétons à faible impact environnemental, poursuit Philippe Hauza, réside en l'absence de réaction de décarbonatation et en la brièveté du temps de passage auprès de la flamme puisque les particules cheminent gravitairement dans un cyclone positionné au plus près de la flamme pendant quelques secondes seulement, ce qui explique en très grande partie son très faible bilan CO₂, réduit presque de moitié par rapport à un métakaolin issu d'un four rotatif. Un autre intérêt du métakaolin flash est qu'il constitue une ultrafine réactive qui peut être utilisée comme addition dans les bétons en substitution partielle du ciment ou comme constituant de liant hydraulique. »

C'est un constituant autorisé par les normes françaises et européennes pour le ciment (NF EN 197-1 et NF EN 197-5) sous le vocable pouzzolane naturelle calcinée. On peut aussi l'utiliser en béton auquel cas il doit être conforme à la norme produit Méta-kaolin NF P 18-513 et à la norme NF EN 206/CN, en substitution d'une partie du ciment, directement en centrale à béton, comme addition pouzzolanique. Il est considéré comme addition de type II dans le complément national français de la norme NF EN 206/CN.



4

© ARGECCO



5

© ARGECCO



6

© ARGECCO

3- Vue aérienne de l'ancienne carrière et des installations d'Argecco Développement.

4- L'un des fronts de taille de la carrière du Brétou.

5- Le site de pré-stockage et d'homogénéisation de l'argile kaolinique.

6- Le matériau de carrière est mis en stock à l'aide d'un bouteur Caterpillar D5H Série II.

Dans son usage actuel, les taux de substitution sont assez limités : 15 % pour un ciment de type CEM I et 10 % pour un ciment de type CEM II/A. Mais cela pourrait évoluer rapidement.

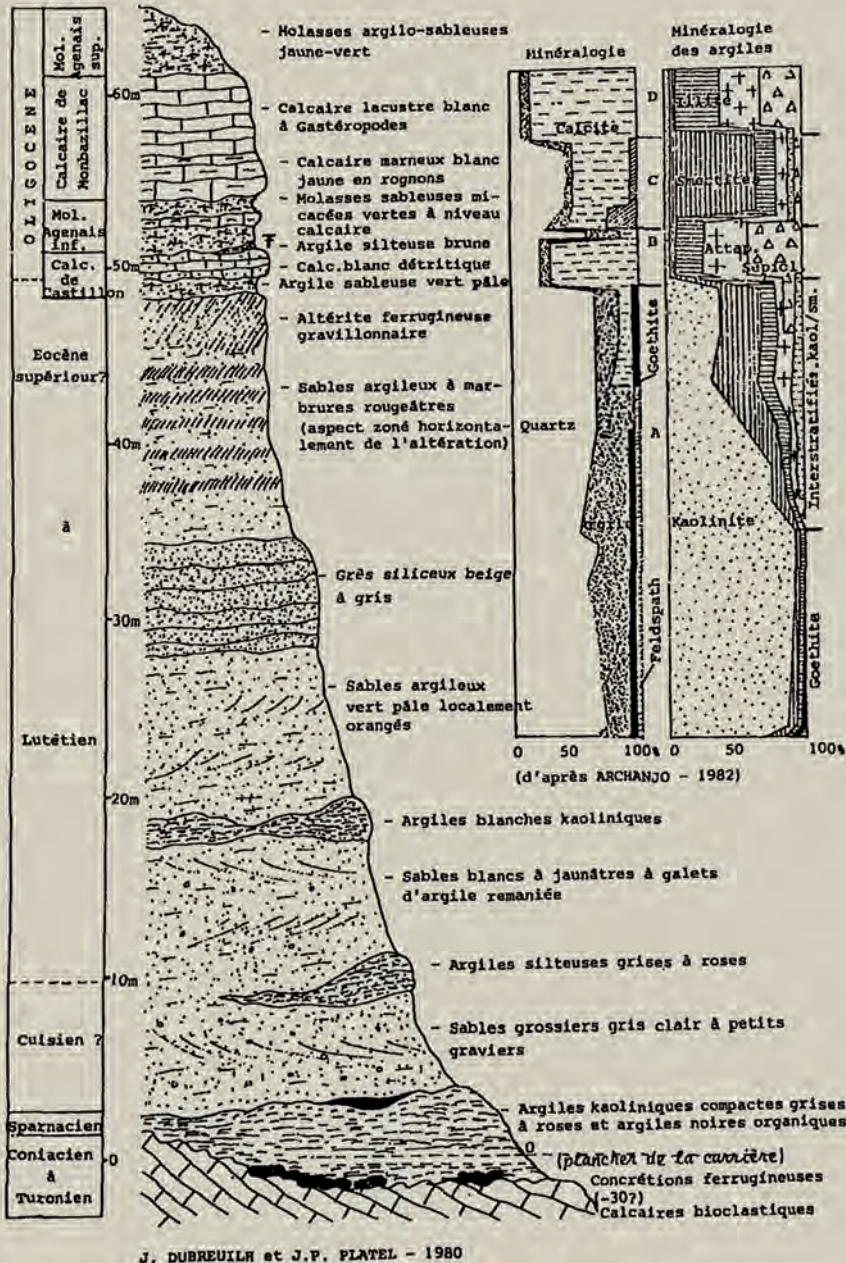
LE PROJET NATIONAL PERFDUB : UNE OUVERTURE POUR L'AVENIR

En effet, dans le cadre du Projet National PerfDuB, dont les journées de restitution des travaux ont commencé à Paris le 28 octobre dernier⁽¹⁾, l'utilisation du métakaolin flash pourrait connaître des développements nouveaux.

En effet, l'objectif principal du Projet National PerfDuB est de définir une méthodologie à l'échelle nationale et internationale de justification de la performance et de la durabilité des bétons (et des structures en béton) par une approche performantielle, incluant la méthode "absolue" et la méthode "comparative". Il s'agit d'agréger les connaissances et le retour d'expérience, de combler les manques, dans

COUPE LITHOSTRATIGRAPHIQUE DE LA CARRIÈRE DU BRÉTOU

(doc J. Dubreuilh et J.L. Platel - 1980)



J. DUBREUILH et J.P. PLATEL - 1980

7- Coupe lithostratigraphique de la carrière du Brétou (doc J. Dubreuilh et J.L. Platel - 1980).

8- Coupe géologique aux abords de la carrière du Brétou.

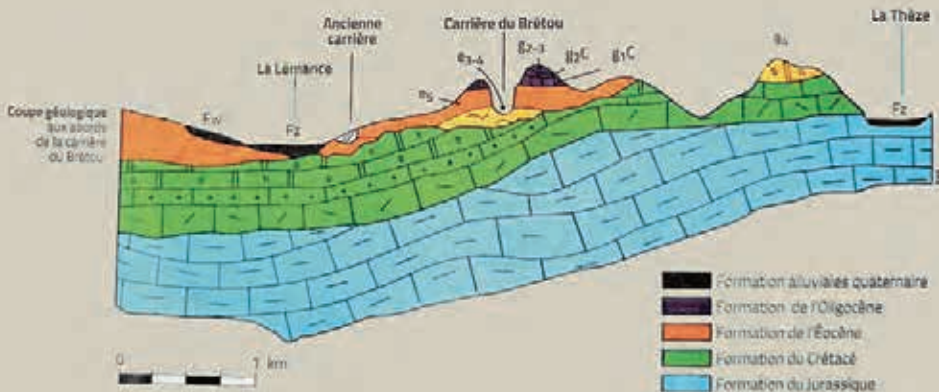
un cadre réunissant tous les acteurs concernés de manière à ce que l'approche performantielle devienne opérationnelle et d'usage courant, ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui. Ce projet a conduit à la rédaction d'un nouveau fascicule de documentation, appelé par la norme NF EN 206/CN, y détaillant comment et dans quelles conditions employer la méthode performantielle. Cette nouvelle méthode constitue un outil qui permet aux formulateurs de sortir de l'approche essentiellement prescriptive de la norme NF EN 206/CN antérieure, autorisant le formulateur à recréer un mélange pouvant déroger à la norme prescriptive sous couvert d'effectuer en amont des études poussées d'essais de performances et de durabilité et de recourir à un contrôle renforcé à l'application.

Il permet aussi possiblement la prescription de bétons intégrant des matériaux recyclés ou à faible impact environnemental hors des prescriptions actuelles de la norme.

« Pour rédiger ce fascicule, le Comité Scientifique et Technique de PerfDuB et la commission de normalisation P18B de l'Afnor se sont appuyés, entre autres, sur les résultats du Projet National PerfDuB, dont une synthèse technique conduite à partir de 42 formulations de béton dont 3 contiennent du métakaolin, précise Philippe Hauza. Pour les utilisateurs de métakaolin, cela permettra d'augmenter le pourcentage d'incorporation actuellement autorisé en dépassant la barrière normative uniquement prescriptive actuelle. »

« Dans cette perspective, nous avons un véritable rôle à jouer car l'impact carbone du métakaolin flash n'est pas critiquable puisqu'il ne s'agit pas d'un sous-produit. Il est donc totalement indépendant des fluctuations de l'industrie lourde (acier, électricité). Son impact carbone est de 139 kg de CO₂ équivalent /t, c'est-à-dire quasiment 6 fois moins que le ciment et très proche de celui du laitier de haut fourneau, qui se situe autour de 100 kg de CO₂ équivalent /t. »

COUPE GÉOLOGIQUE AUX ABORDS DE LA CARRIÈRE DU BRÉTOU



Pour le clinker, cette valeur est de 805 kg de CO₂ équivalent /t et pour les ciments CEM I de 765 kg de CO₂ équivalent /t. Il constitue donc un ingrédient qui est naturellement bas carbone. »

**CÔTÉ CHANTIERS :
TROIS RÉFÉRENCES
SIGNIFIANTES**

Trois réalisations intégrant du métakaolin flash mettent en évidence l'intérêt de ce matériau dans la réalisation d'infrastructures routières, d'ouvrages d'art ou de bâtiment : autoroute A20 à Limoges, Ligne B du métro de Rennes, hôpital Nord Deux-Sèvres à Niort.

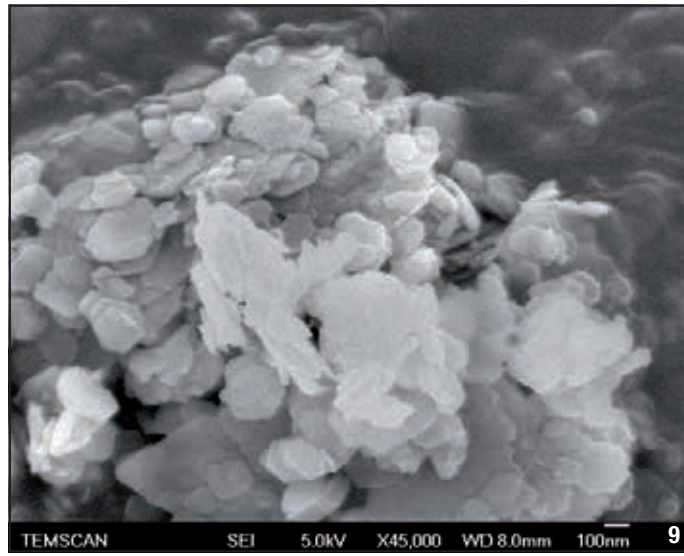
Autoroute A20 : la DIR Centre-Ouest a réaménagé le terre-plein central de l'autoroute A20 au niveau de la traversée de Limoges en remplaçant les glissières métalliques par une glissière centrale en béton armé extrudé (GBA). Sur ce chantier, le métakaolin flash a été employé à hauteur de 12% en substitution de la même proportion de ciment et en n'utilisant aucun filler calcaire, malgré la présence d'un sable lavé pauvre en fines.

Pour proposer un béton extrudé de qualité en dépit du déficit en fines de la fraction sableuse, Irribaren Béton a utilisé le métakaolin flash d'Argeco Développement et l'a proposé à Colas Grands Travaux pour réaliser 2000 m³ de béton extrudé C30/37.

Grâce à ses caractéristiques physico-chimiques, le métakaolin flash a procuré au béton extrudé une robustesse des paramètres rhéologiques, ce qui a permis d'exécuter le chantier de façon sereine en dépit de températures élevées, y compris nocturnes, les coulages ayant été effectués de nuit.

Ligne B du métro de Rennes : la construction de la ligne B du métro de Rennes comprend la réalisation d'un viaduc de 2,4 km comportant 71 piles en béton de 10 à 20 m de hauteur, représentant un volume unitaire de 30 m³ et 974 voussoirs, de 12,50 m³ à 25 m³ unitaires.

Pour respecter les contraintes inhérentes à la réaction sulfatique interne (RSI) de ces pièces massives, il a été nécessaire de maintenir la température interne du béton frais à 24°C en été. De plus, afin de satisfaire les vitesses de décoffrage en hiver, la température du béton a dû être maintenue à 13°C minimum durant les périodes de froid, ce qui a conduit Pigeon Matériaux, fournisseur du BPE, à chauffer les granulats. Au cours de ce chantier d'une durée de 18 mois, 25000 m³ de béton ont été coulés par des températures exté-



rieures comprises entre -9°C et +30°C, pour la construction de l'ensemble des pièces du viaduc.

« Pour la formulation des bétons, indique Philippe Hauza, Argeco Développement a proposé un autre produit de sa gamme : le métakaolin flash Argicem blanc.

Qu'il s'agisse des piles ou des voussoirs, l'intégralité des critères techniques du cahier des charges a été respectée. Le chantier réalisé par Razel-Bec a mis en évidence que, pour atteindre de hautes ou de très hautes performances, le métakaolin flash peut constituer un véritable atout. »

Centre hospitalier Nord Deux-Sèvres :

situé à Faye-l'Abesse, à proximité de Niort (79), ce centre hospitalier s'inscrit dans le contexte de la mutualisation des moyens hospitaliers régionaux : il remplace trois centres existants de plus petite taille.

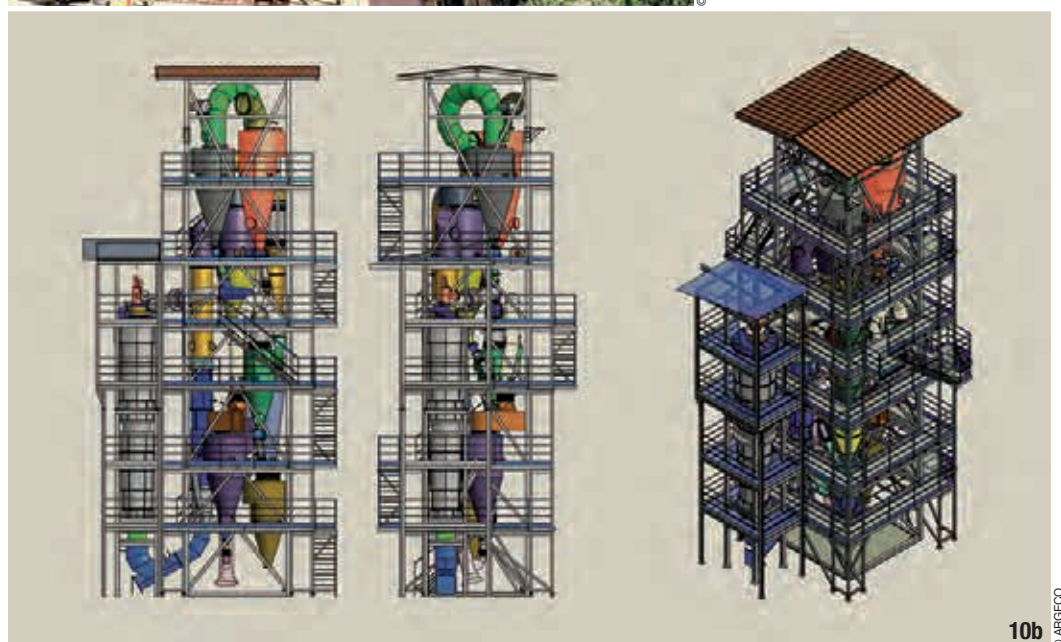
Les travaux comprenaient, notamment, le coulage des planchers.

Bouygues Bâtiment Centre Sud-Ouest et Bouygues Bâtiment Grand Ouest ont opté pour des bétons horizontaux



9- Observation au MEB (Microscopique Électronique à Balayage) de particules de métakaolin.

10a & 10b- La tour de calcination flash permet la transformation de l'argile kaolinique en métakaolin flash.





11
© ARGECO



12
© ARGECO

et verticaux autoplaçants (BAP). Pour les premiers, un étalement de 650 mm (+/- 50 mm) était demandé avec un maintien de rhéologie d'au moins 1 heure, sachant que les coulages étaient étalés sur l'ensemble d'un été

avec des températures allant jusqu'à +35°C. De plus, pour limiter les risques de fissuration, le cahier des charges de Bouygues exigeait un faible volume de pâte et un rapport eau/liant maîtrisé. « Depuis plusieurs années, Argeco

Développement a largement étayé ses connaissances sur les BAP en mettant en place une méthode de formulation adaptable à ce type de bétons fluides. Cette méthode s'est traduite par quelques publications scientifiques,

notamment celle "Self compacting concrete using flash-metakaolin design method." »

« En tirant parti des avantages procurés par le métakaolin flash, Argeco Développement a proposé des formulations de BAP intégrant plusieurs types de ciments et de granulats, dans lesquelles le volume de pâte a été réduit par rapport à la formule de référence. »

Pour ce chantier, Bouygues s'est associé à RBS pour concevoir, fabriquer et mettre en place un BAP contenant 50 kg/m³ de métakaolin flash et répondant tous les critères exigés par le cahier des charges.

Pour le centre hospitalier Nord Deux-Sèvres, l'utilisation de métakaolin flash a permis de couler 9000 m³ de BPA horizontaux à faible volume de pâte avec un étalement de 680 mm maintenu pendant 2 heures. ▷

11- Le convoyeur d'alimentation en métakaolin.

12- Vue générale de l'emprise et de l'intégration d'Argeco Développement dans son environnement. Le canyon au second plan a été creusé dans les années 1970-1980.

13- Reprise du matériau à l'aide d'une chargeuse sur pneus Liebherr L 538.



13
© ARGECO

LE SITE ARGECO DU BRÉTOU À FUMEL

Le site Argeco du Brétou à Fumel, dans le Lot-et-Garonne, a connu une histoire plus que séculaire. Découverte dès 1910, la carrière - initialement exploitée de manière artisanale (non mécanisée) par la Société des Produits Réfractaires de Fumel et Libos produisait des argiles destinées à la fabrication de réfractaires pour la briqueterie de Monsempron-Libos, puis très vite pour la fonderie de Fumel (revêtement des hauts fourneaux et fabrication de cubilots).

En 1914, l'effort de guerre, puis la reconstruction du pays garantissent l'essor de la fonderie de Fumel et le développement de la carrière proche qui la fournit. Celle-ci perdure ainsi durant l'entre-deux-guerres et la période de reconstruction post 1945. À partir de 1965, la carrière du Brétou est cette fois exploitée industriellement (mécanisation de l'extraction et du transport).

En conséquence, seuls les matériaux les plus concentrés en kaolinite (teneur en kaolinite > 90 %) sont recherchés, générant alors d'importants mouvements de déblais-remblais.

En effet, le gisement de kaolinite "pure" se trouve sous une épaisse découverte (30 à 50 m) dont l'extraction préalable à l'exploitation du gisement aboutit à la création d'un profond canyon et de trois importants terrils qui ont façonné le paysage alentour. Ces terrils sont actuellement recouverts d'une végétation "de reconquête", plus récente

que les forêts et les végétations environnantes. En 1973, la Société Européenne de Production de Réfractaires de Libos (SEPR) obtient une autorisation d'exploiter le site sur une surface de plus de 32 hectares. Puis en 1981, cette autorisation est cédée à Lafarge, qui exploitera à son tour la carrière du Brétou jusqu'en 1996.

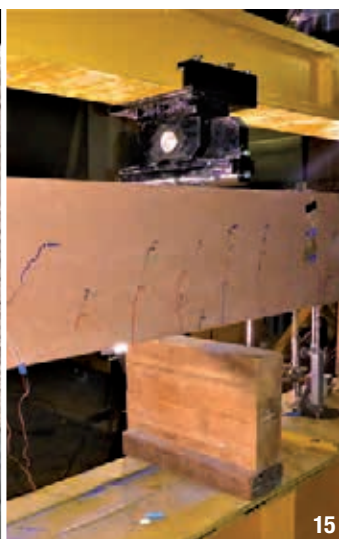
À partir de cette date, la société Argiles d'Aquitaine acquiert la carrière jusqu'en 2003, date à laquelle le filon d'argiles "pures" n'est toujours pas épuisé.

En 2004, la société Demeter Technologies reprend le site à son compte, avec une autorisation d'exploitation d'une durée de 20 ans. Sur le site, Demeter développe et construit une installation de calcination flash unique en France, ainsi que divers équipements annexes (hangar, laboratoire, bureaux, ateliers) puis, une fois l'installation opérationnelle, crée Argeco Développement mi-2005 afin de construire et opérer l'usine de calcination flash et de commercialiser le métakaolin. En 2015, après reprise du site à 100 % par Colas, l'autorisation d'exploitation est reconduite pour 30 ans.

Argeco Développement compte 15 salariés et est dirigé par Aurélien Gancarz (Chef de Centre), assisté de Pierre Drelon (Ingénieur applications et produits) et Dr Raphael Bucher (Ingénieur Recherche et Développement).



14 © MARC MONTAGNON



15 © ARGECO



16 © ARGECO



17 © ARGECO

Le produit a été très apprécié pour son excellente thixotropie qui lui confère une très bonne capacité à s'écouler et occuper les espaces disponibles.

DEVENIR UN CONSTITUANT PRINCIPAL DU BÉTON

L'objectif affiché d'Argeco Développement est de passer de 15 à 30 % de substitution pour les ciments CEM I et de 10 à 20 % pour les ciments CEM II/A ainsi que d'ouvrir la possibilité de substitution à d'autres types de ciments tels que les CEM II/B (65 % de clinker) et les CEM III/A (64 % de clinker).

« Pour anticiper la tendance qui risque d'arriver suivant laquelle, pour des raisons environnementales, les cimenteries pourraient être amenés à réduire la production de CEM I et de CEM II/A et, à terme d'assécher la possibilité d'ajouter les bétons, l'ouverture aux mélanges et à d'autres types de ciment pourrait être une solution au besoin de réduction de l'empreinte carbone. »
« Avec une empreinte carbone divisée par un peu plus de six par rapport au ciment Portland, le métakaolin flash s'affiche comme un candidat sérieux pour réduire l'impact carbone présent par les matériaux cimentaires⁽²⁾. »

Ainsi, il pourrait également devenir possible, avec le métakaolin flash, d'introduire des bi-additions, c'est-à-dire de mélanger entre elles deux additions afin d'obtenir des synergies, alors que la norme, telle qu'elle est rédigée à l'heure actuelle, ne considère qu'une addition. « C'est encore une barrière qu'il est nécessaire de faire bouger, précise Philippe Hauza, car elle nous prive de cette possibilité de synergie qui existe historiquement dans les ciments. Dans un stade ultime, l'évolution la plus significative pour nous serait de

COLAS : GRANDES DATES ET CHIFFRES CLÉS

Décennie 1930 : la Société Routière Colas (SRC) est créée le 16 mai 1929 ; en 1934, le capital passe entre les mains de la Royal Dutch Shell. La SRC réalise ses premiers chantiers en France et se développe en Afrique (Algérie, Maroc, Sénégal) et aux Antilles ; lancement des produits spéciaux Colsol, Colasmix, Colprovia.

Décennie 1940 : la SRC fait l'objet d'une mesure de séquestre par les autorités allemandes ; création de trois filiales Colas hors métropole.

Décennie 1950 : création du département technique et du laboratoire central de Bonneuil-sur-Marne ; début de l'activité signalisation ; le groupe Shell cède le contrôle de la Société Routière Colas.

Décennie 1960 : première cotation boursière, premières activités en Amérique du Nord ; démarrage de l'activité carrières.

Décennie 1970 : la SRC participe au groupement Cofiroute ; mise au point du Colflex® ; création de la première filiale nord-américaine du groupe : Barrett Paving Materials.

Décennie 1980 : la SRC devient Colas ; Bouygues devient l'actionnaire majoritaire de Colas ; premier contrat en Asie ; Colas se développe l'Océan Indien.

Décennie 1990 : expansion en Europe, aux USA et au Canada ; nouvelles activités réseaux et étanchéité ; création de la fondation Colas.

Décennie 2000 : création du pôle ferroviaire Colas Rail ; Colas s'implante en Australie ; Colas crée Scintiflex®, premier enrobé esthétique réfléchissant la lumière et Végécol®, premier liant routier d'origine végétale.

Décennie 2010 : lancement de la route photovoltaïque Wattway ; création de Colas Projects ; acquisition de Miller McAsphalt (Canada) ; Colas réalise plus de la moitié de son activité à l'international ; Argeco Développement rejoint Colas.

Décennie 2020 : acquisition de Destia Oy (Finlande) ; engagements RSE ; Colas réunit sous la marque Premys ses 11 filiales dédiées à la déconstruction ; naissance de Tersen, filiale engagée dans l'économie circulaire et la valorisation.

CHIFFRES CLÉS :

- 13,2 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2021 ;
- 50 pays d'implantation dans le monde ;
- 57 000 collaborateurs (décembre 2021) ;
- 3 000 unités de production et recyclage de matériaux ;
- Premier producteur mondial d'émulsions de bitume ;
- Septième carrier mondial.

14- Maquette d'un mur à coffrage intégré en béton décarboné à base de métakaolin flash.

15- Béton de géopolymère Argeco en cours de test mécanique (essai de flexion sur poutre) au LMDC de Toulouse.

16- Glissière centrale en béton armé extrudé sur l'A20 réalisée en béton incluant du métakaolin flash.

17- Revêtement de type sable stabilisé renforcé en Com-paxem effectué au Maroc.

devenir avec le métakaolin, non plus une addition mais l'ingrédient principal de nouveaux liants pour de nouveaux bétons. »

En clair, le métakaolin représenterait plus de 50 % du mélange avec des liants ne comportant quasiment plus de clinker.

« Dans les bétons actuels et de demain, conclut Philippe Hauza, la contribution d'Argeco Développement sera de permettre la production de bétons en méthode performantielle avec des pourcentages d'incorporation de métakaolin bien au-delà de ce que l'approche prescriptive préconise actuellement. Ce sera ensuite à horizon 2 ans, des pourcentages d'incorporation en prescriptif très élargis ainsi que l'introduction de bi-additions pour



18- Le viaduc de la Ligne B du métro de Rennes : en béton à base de métakaolin flash Argicem blanc.

19- Les bétons autoplaçants verticaux et horizontaux du Centre Hospitalier Nord - Deux-Sèvres (CHNDS) ont intégré du métakaolin flash.

20- Pour le chantier du CHNDS, Bouygues s'est associé à RBS pour concevoir, fabriquer et mettre en place un BAP contenant 50 kg/m³ de métakaolin flash.

parvenir enfin à l'arrivée de nouveaux liants à base de métakaolin comme matière première et comme constituant principal. »

« En effet, le métakaolin permet de formuler et d'appliquer des bétons couvrant toutes les gammes de résistances et, en particulier, les bétons à hautes

MÉTAKAOLIN : BÉTONS ET LIANTS ROUTIERS

Le métakaolin flash est techniquement utilisable dans tous types de bétons, qu'ils soient préfabriqués ou prêts à l'emploi. L'expérience montre que le taux de substitution actuellement utilisé se situe entre 10 et 20% des quantités de ciment. Le métakaolin est aussi utilisé en complément du ciment dans des formulations de béton à haute ou très haute performance. Dans ce domaine, il se substitue à l'utilisation classique de fumées de silice à un prix beaucoup plus compétitif.

Pour le bâtiment et le génie civil, Argeco Développement distribue quatre produits destinés au béton :

- **Argicem** : métakaolin flash de teinte saumonée ;
- **Metaflash HP** : métakaolin flash pour bétons soumis à des milieux très agressifs, en substitution à la fumée de silice ou au laitier de haut fourneau ;
- **Argibap** : mélange de métakaolin flash et d'addition calcaire employé pour la formulation des bétons auto-plaçants ;
- **Argicem blanc** : métakaolin flash de teinte blanche.

Argeco Développement distribue également quatre liants hydrauliques routiers à base de métakaolin flash :

- **Compaxem** : liant pouzzolanique très réactif destiné à la confection de BCR (Bétons Compactés au Rouleau) ;
- **Argiliant / Argiliant+** : liants hydrauliques routiers adaptés au traitement des sols fins ;
- **Argistab** : liant hydraulique pour le traitement des sables stabilisés renforcés ;
- **Argichaix** : liant hydraulique pour l'amélioration de la portance des sols.

et très hautes performances ainsi que les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP). »

À ce jour, les études montrent qu'il est aisé d'obtenir ces trois types de bétons, en remplaçant en totalité la fumée de silice par du métakaolin flash.

Dans une certaine continuité et pour des ouvrages précontraints ou des immeubles de grande hauteur, les BFUP formulés avec du métakaolin possèdent un comportement au fluage assez proche de ceux formulés avec une fumée de silice, en conformité avec les courbes enveloppes des Eurocodes Bâtiments et Eurocode Ponts avec fumée de silice.

Le métakaolin représente donc une alternative efficace et très concurrentielle tout en constituant par ailleurs une addition à forte valeur ajoutée pour les bétons durables. □

1- Quatre journées de restitution de ces travaux : à Paris (28 octobre 2022), Lyon (17 novembre 2022), Toulouse (14 décembre 2022) et Nantes (18 janvier 2023).

2- La fabrication du ciment Portland est émettrice d'importantes quantités de dioxyde de carbone (CO₂), notamment à cause du clinker qui en est le matériau principal. Pour 1 000 kg de CEM I produits, 866 kg de CO₂ sont libérés dans l'atmosphère (source Ademe).





ENJEUX ET PERSPECTIVES DU PN PERFDUB

AUTEURS : GILLES ESCADEILLAS, PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS, LMDC TOULOUSE -
FRANÇOIS CUSSIGH, RESPONSABLE INGÉNIERIE MATÉRIAU BÉTON, VINCI CONSTRUCTION

LE PROJET NATIONAL PERFDUB, INITIÉ EN 2015 ET TERMINÉ EN 2022, A POUR BUT DE RÉVISER LES RÈGLES DE FORMULATION DES BÉTONS PERMETTANT À LA FOIS D'OUVRIRE LA PORTE À DES INNOVATIONS CONDUISANT À MINIMISER L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DE LA CONSTRUCTION EN BÉTON ET DE DONNER DES GARANTIES SUPÉRIEURES DE DURABILITÉ DES OUVRAGES, EN PARTICULIER DANS LES AMBIANCES LES PLUS AGRESSIVES. IL S'INSCRIT DANS UNE DYNAMIQUE QUI SE POURSUIT SUR LA BASE DES OUTILS QU'IL A DÉVELOPPÉS.

INTRODUCTION

La construction de nouveaux ouvrages entre dans une nouvelle ère qui doit intégrer, en plus des contraintes usuelles techniques et économiques, à la fois des contraintes environnementales, liées pour une grande partie aux changements climatiques, et des contraintes sociétales, liées aux attentes de plus en plus fortes des usagers, notamment sur leur durabilité.

C'est le cas en particulier des ouvrages en béton armé et précontraint, les plus nombreux, mais dont la fabrication des principaux constituants, béton et acier, demande une grande quantité d'énergie et conduit à des dégagements importants de gaz à effet de serre, et dont la durabilité est souvent remise en question au point de conduire parfois à des ruptures avec pertes humaines.

Ainsi, ces dernières années, de nouveaux bétons plus respectueux de l'environnement - bétons bas carbone - ont vu le jour (par exemple, les piles du viaduc de Lorette (figure 2)) et des besoins de qualification de ces bétons, principalement en termes de durabilité, sont apparus.

Une solution pour qualifier ces bétons est de s'appuyer sur l'approche performantielle, méthode qui consiste à étudier la durabilité des bétons en considérant certaines caractéristiques ou propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données et pas seulement, comme c'est souvent fait, les seules données liées à la formulation.



© PASCAL LE DOARE

1- Piles du pont de l'île de Ré.
2- Viaduc des Lorettes sur la ligne TGV SEA.

1- Piers of the île de Ré bridge.
2- Lorettes viaduct on the SEA TGV line.

S'il est connu que les ouvrages en béton ont une durabilité potentielle très importante (voir par exemple le pont de Boutiron (figure 3) réalisé par E.Freyssinet il y a plus de 100 ans, expertisé dans le cadre du PN, et qui est en très bon état de conservation), une méthodologie de qualification rapide de cette durabilité permettant de mettre en œuvre des formulations innovantes est aujourd'hui nécessaire.

INTÉRÊT DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

L'approche performantielle est un véritable changement de paradigme dans le domaine de la construction d'ouvrages, notamment en béton, dans le sens où l'on doit passer d'une obligation de moyens, fixés généralement par des normes (Eurocode, EN 206, etc.), à une obligation de résultats pour une durée de vie donnée de l'ouvrage considéré dans son environnement.

C'est aussi un nouveau challenge pour l'ensemble des intervenants dans l'acte de construire en termes d'optimisation à la fois technico-économique et environnementale, tout en diminuant autant que possible les futurs coûts de maintenance.

Bien évidemment, afin de garantir une qualité et une sécurité des ouvrages pour les maîtres d'ouvrage et les usagers, il est nécessaire de bien enca-

dre ce changement en le normalisant autant que possible.

Cela passe par la mise au point d'essais de qualification, qui se doivent d'être rapides et robustes, et autant que possible normalisés, et de normes d'application fixant les conditions d'utilisation de l'approche performantielle. C'était l'objet du Projet National PerFDuB, qui s'est déroulé de 2015 à 2022.

LIMITES ACTUELLES DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

L'approche performantielle est citée depuis le début des années 2000 dans les différentes versions de la norme béton EN 206. Ainsi, les bétons définis et validés par l'approche performantielle restent avant tout des bétons normalisés, utilisant des constituants conformes aux normes, avec les propriétés d'usage aux états frais et durci a minima conservées. Selon cette norme NF EN 206/CN, il est possible de prescrire un béton selon plusieurs approches :

→ L'approche prescriptive, qui s'appuie sur les tableaux de l'annexe NA.F. de cette norme et qui vise une durée de vie de 50 ans, complétée, pour les ouvrages d'art, par les dispositions du fascicule 65 du CCTG qui vise une durée de vie de 100 ans. Cette approche définit des spécifications essentiellement en termes de moyens (nature et dosage des constituants) et n'utilise la spécification de résultat que sur la résistance mécanique ou la teneur en air des bétons à air entraîné ;



3 © MATHIEU CIPIERE



4 © FRANCIS VIGOURLOUX

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

Cependant, dans la version 2014 de cette norme comme dans la version originelle de 2004, l'approche performantielle ne fait pas l'objet de règles normatives détaillées que ce soit au niveau français comme au niveau européen. Ainsi, les quelques indications informatives fournies ne facilitent pas l'appropriation et le déploiement de ce type d'approche pour l'ensemble des acteurs de la construction et, de fait, elle reste encore marginale et réservée aux grands ouvrages.

Il existait toutefois en France deux documents qui faisaient déjà référence au début du Projet National PerfDuB :

- Les recommandations professionnelles provisoires FNTP/FFB/CERIB/FIB de mars 2009, intitulées "Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons", fondées sur le concept de performance équivalente comme défini dans l'article 5.2.5.3 de la norme EN 206. Le principe est de modifier les prescriptions de composition des bétons sur la base d'essais performantiels et d'indicateurs de durabilité qui doivent démontrer que le béton à qualifier possède des propriétés de durabilité au moins aussi bonnes que celles d'un béton de référence ;
- Le guide du Lcpc "Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton - Application de l'approche performantielle" de mars 2010, élaboré à partir du guide Afgc pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, de juillet 2004, et déclinée pour son application aux ouvrages d'art. Ce guide présente une démarche globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé, basée essentiellement sur la notion d'indicateurs de durabilité, qui permet de prendre en compte les exigences liées au matériau béton vis-à-vis des objectifs de durabilité. Il permet de traiter, en particulier, les cas où l'approche prescriptive conduit à des exigences difficiles à concilier, par exemple vis-à-vis du gel et de la réaction sulfatique interne.

Ainsi, au début du projet PerfDuB, nous disposions déjà de connaissances et de données de base indispensables au développement de l'approche performantielle ainsi que d'un premier

3- Pont de Boutiron sur l'Allier.

4- Pont de Rion-Antirion.

3- Boutiron Bridge over the Allier.

4- Rion-Antirion Bridge.

retour d'expérience significatif sur des premiers ouvrages conçus sur les bases de l'approche performantielle, comme le pont de Rion-Antirion.

Les investigations sur ouvrages anciens réalisées dans le cadre du PN ont permis de confirmer que l'approche prescriptive usuelle ne permettait pas toujours d'obtenir la durée de vie escomptée. Les piles du pont de l'île de Ré, malgré le respect des spécifications usuelles des ouvrages en béton en milieu marin (qualité du béton, épaisseur d'enrobage), montrent des signes de corrosion prématurés (figure 1).

L'approche performantielle permet également, grâce à l'emploi de pâtes cimentaires optimisées, de qualifier des formules de béton avec des granulats présentant une absorption d'eau supérieure aux limites usuelles, tels que les granulats recyclés, certains granulats calcaires ou des granulats éruptifs présentant un caractère vacuolaire (par exemple les granulats basaltiques présents sur l'île de La Réunion et qui ont servi aux bétons du grand viaduc en mer de la Nouvelle Route du Littoral).

L'APPROCHE PERFORMANTIELLE SUR LE PONT RION-ANTIRION

Le pont de Rion-Antirion (Grèce) est un ouvrage exceptionnel pour lequel une durée de vie de 120 ans a été requise

comme critère essentiel du cahier des charges fixé lors de sa construction entre 1999 et 2004. Du fait de sa situation géographique, dans le golfe de Corinthe, la durabilité des bétons soumis à l'environnement marin agressif a été une préoccupation majeure lors de la conception de cet ouvrage avec notamment la corrosion des armatures induite par la pénétration des chlorures. L'approche performantielle, et plus particulièrement la prévision de la pénétration des chlorures dans les parties d'ouvrage les plus exposées en zone de marnage, a permis de justifier la prévention de la corrosion des armatures sans mise en œuvre de protection cathodique (figure 4).

RAPPEL DES OBJECTIFS DU PROJET NATIONAL PERFDUB

Le principal objectif du Projet National PerfDuB était de définir à l'échelle nationale une méthodologie autant que possible normalisée de justification de la durabilité des bétons et des structures en béton par approche performantielle, qu'elle soit absolue ou comparative, et potentiellement transposable au niveau européen. Les objectifs sous-tendus étaient la valorisation des matériaux locaux comme constituants du béton, afin de limiter les impacts économiques et environnementaux, et la montée en compétence des acteurs et notamment des laboratoires d'essais.

Les ouvrages visés étaient les ouvrages neufs pour lesquels un niveau spécifique d'assurance qualité doit être assuré, comme les ouvrages courants de génie civil, certaines constructions de bâtiments complexes et certains produits préfabriqués en usine. Des investigations ont aussi été menées sur les ouvrages anciens dans le but de relier



5

© VÉRONIQUE BOUTELLER

les pathologies observées au type de béton employé, à son environnement et à ses caractéristiques intrinsèques de durabilité.

ENJEUX DU PROJET NATIONAL

ENJEUX SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Les principaux enjeux scientifiques et techniques du Projet National étaient de démontrer, à partir de formulations spécifiques et d'essais basés sur différents indicateurs de durabilité, le bien-fondé de l'approche performantielle. Une gamme de 42 bétons a ainsi été définie incluant des formulations pour lesquelles le retour d'expérience n'était pas important mais qui s'inscrivent dans une démarche globale de développement durable. Plus de 2500 éprouvettes ont été fabriquées et mises à disposition des partenaires réalisant les essais. Les effets de la variabilité des constituants et de la production du béton ont aussi été étudiés sur des chantiers témoins dont le viaduc de la Nouvelle Route du Littoral.

5- Corps d'épreuve exposés au pied de la Tour Saint-Nicolas à La Rochelle (à gauche ceux du PN BHP 2000, à droite ceux du PN PerfDuB).

5- Test specimens exposed at the foot of Saint-Nicolas Tower in La Rochelle (left-hand: for the "PN BHP 2000" project; right-hand: for the "PN PerfDuB").

Plusieurs résultats ont été obtenus, répondant aux enjeux fixés, qui se traduisent par :

- Un fascicule de documentation pour la mise en œuvre pratique de l'approche performantielle : FD P18-480 ;
- Un recueil de synthèse, justificatif du fascicule de documentation, en français et en anglais ;

- Plusieurs textes normatifs issus directement ou indirectement des travaux du Projet National ;
- Des textes d'essais non normalisés.

ENJEUX ÉCONOMIQUES

Les enjeux économiques, non évalués au cours du projet, peuvent être de plusieurs sortes :

- Des économies à la construction, en privilégiant des constituants locaux et en particulier les granulats (moins de transport), en optimisant le dosage en ciment par l'utilisation d'additions normalisées (coût généralement inférieur), en optimisant les enrobages en fonction des classes d'exposition (moins de béton), etc. ;
- Des économies à l'entretien des ouvrages, les ouvrages devant être par définition mieux adaptés à leur environnement et donc moins sensibles aux agressions qui ont été prises en compte dès leur conception ;
- Des ouvrages à plus grande durée de vie (120 ans par exemple pour le pont de Rion-Antirion).

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Les enjeux environnementaux, non évalués au cours du projet, sont assez directement liés aux enjeux économiques :

- En privilégiant les matériaux locaux, on diminue l'impact environnemental du transport ;
- En diminuant le dosage en ciment (clinker), on diminue les émissions de gaz à effet de serre ;
- En permettant l'utilisation de matériaux recyclés, on diminue les mises en décharge (économie circulaire).

ENJEUX SOCIÉTAUX

Les enjeux sociétaux, non évalués au cours du projet, peuvent être évalués de la manière suivante :

- Moins de gêne lors de la construction (moins de transport lié à l'utilisation privilégiée de ressources locales) ;
- Moins de gêne à l'usage (du fait d'un entretien réduit) ;
- Diminution des risques, réels ou perçus (moins de fissures et d'aciers apparents par exemple) ;
- Maintien d'un patrimoine (pas ou peu de dégradation visible).

PERSPECTIVES

POURSUITE DES TRAVAUX

Comme pour le projet BHP 2000, des corps d'épreuve ont été fabriqués pour un suivi dans le temps (durée de 20 ans) :

- 11 sur le site de la Tour Saint-Nicolas (figure 5) à La Rochelle (XS3m) ;
- 11 sur le site du Cerib à Épermon (XC4) ;
- 3 instrumentés sur le site Eqiom au Grand Port de La Rochelle (XS3e) ;
- 3 instrumentés sur le site de l'Université Gustave Eiffel (XC4).

Par ailleurs une méthode de qualification par méthode performantielle générique (portant non pas sur une seule formulation de béton mais sur une famille de formulations) est en cours de définition sur la base des outils développés dans le cadre du Projet National.

QUALIFICATION ENVIRONNEMENTALE

L'approche performantielle, telle qu'elle est développée, s'inscrit parfaitement dans une démarche générale d'économie circulaire avec des phases d'éco-conception, de consommation responsable, d'allongement de durée de vie et de recyclage possible en fin de vie du premier ouvrage. Pour qualifier cette démarche, il conviendrait d'évaluer plusieurs scénarios par des analyses de cycle de vie environnementale, économique et sociétale. □

ABSTRACT

CHALLENGES AND PROSPECTS FOR THE PERFDUB NATIONAL PROJECT

GILLES ESCADEILLAS, LMDC TOULOUSE - FRANÇOIS CUSSIGH, VINCI CONSTRUCTION

The current challenges concerning the environmental impacts of human activity require that the construction industry call into question the concrete certification rules by adapting them to be able to verify by fast testing that innovative mix designs will continue to provide the expected durability. The PerfDuB National Project has made it possible to develop the relevant tools, regarding both the performance test methods and criteria for interpretation of those tests. It also aimed to prepare subsequent work on the durability of concretes by manufacturing a series of test specimens exposed to carbonation and/or marine chlorides. □

DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS DEL PROYECTO NACIONAL PERFDUB

GILLES ESCADEILLAS, LMDC TOULOUSE - FRANÇOIS CUSSIGH, VINCI CONSTRUCTION

Los desafíos actuales relativos a los impactos medioambientales de la actividad humana imponen al sector de la construcción un cuestionamiento de las normas de calificación de los hormigones, adaptándolas para poder justificar mediante ensayos rápidos que las formulaciones innovadoras seguirán garantizando la durabilidad prevista. El Proyecto Nacional PerfDuB ha permitido desarrollar las herramientas correspondientes, a la vez en materia de métodos de ensayo de rendimiento y de criterios de interpretación de dichos ensayos. Asimismo, se ha centrado en preparar la continuación de los trabajos sobre durabilidad de los hormigones, confeccionando una serie de cuerpos de prueba expuestos a la carbonatación y/o a los cloros marinos. □



© MATHIEU CIPPIÈRE

RECUEIL ET ANALYSE DES DONNÉES OBTENUES SUR LES OUVRAGES EXISTANTS

AUTEURS : BRUNO GODART, EXPERT INTERNATIONAL, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL - MICHAËL DIERKENS, EXPERT BÉTON, CEREMA
Les données présentées sont le fruit des travaux pilotés par : Nathalie Cordier, chef d'unité, Cerema - Benoît Thauvin, chef d'unité, Cerema Saint-Brieuc - Bruno Boulet, expert béton, Cerema Clermont-Ferrand - Arnaud Campaner, responsable activité béton, Cerema Strasbourg - Myriam Bouichou, pôle scientifique béton, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques - Véronique Baroghel-Bouny, directrice de recherche, Université Gustave Eiffel

POUR FIXER LA VALEUR SEUIL DES INDICATEURS DE DURABILITÉ, IL EST IMPORTANT DE PRENDRE EN COMPTE LE RETOUR D'EXPÉRIENCE QUE L'ON PEUT ACQUÉRIR SUR LE COMPORTEMENT RÉEL DES OUVRAGES EXISTANTS. DANS LE CADRE DU PROJET PERFDUB, 19 OUVRAGES ONT ÉTÉ SÉLECTIONNÉS ET EXPERTISÉS AFIN DE CONSTITUER UNE BASE DE DONNÉES D'INDICATEURS DE DURABILITÉ ET DE TÉMOINS DE DURÉE DE VIE. UNE ANALYSE APPROFONDIE DE L'ÉVOLUTION DES INDICATEURS DE DURABILITÉ, CONDUITE EN PARALLÈLE AVEC UNE ANALYSE DE L'ÉTAT DES OUVRAGES, EST PRÉSENTÉE DANS CET ARTICLE ; ELLE PREND EN COMPTE LES MODÈLES DE CORROSION DÉVELOPPÉS AU SEIN DU PROJET ANR MODEVIE.

RAPPEL SUR LA MÉTHODOLOGIE

Pour fixer la valeur seuil des indicateurs de durabilité utilisés dans le cadre de la méthode performantielle de durabilité des ouvrages en béton, il est important

de prendre en compte le retour d'expérience que l'on peut acquérir sur le comportement réel des ouvrages existants. Pour parvenir à cet objectif, il est nécessaire d'étudier l'évolution des indicateurs de durabilité des

1- Vue générale du pont de Boutiron.

1- General view of Boutiron Bridge.

ouvrages en béton dans leur environnement, sous l'effet du vieillissement du béton et des agressions extérieures. C'est pourquoi 19 ouvrages ont été sélectionnés et expertisés (ponts, quais, monuments historiques, barrage) afin

TABEAU 1 : LISTE DES OUVRAGES ÉTUDIÉS INCORPORANT LES CORPS D'ÉPREUVE DE BHP 2000

Âge	Classe d'exposition		
	XC3-XC4	XS2-XS3	XF3-XF4-XD3
Moins de 20 ans	Corps d'épreuve BHP 2000 Pont de Loudéac (2014) Pont de Volesvres (2010-12)	Corps d'épreuve BHP 2000 Structure maritime X ^(*) (2014) Pont de Rion-Antirion en Grèce (1999-2004)	Corps d'épreuve BHP 2000
Entre 20 et 50 ans	-	Pont Vasco de Gama (1995-98) Piles du pont de l'île de Ré (1987-1988) Pont Chateaubriand sur la Rance (1987-91)	Pont de St-Poncy (1988) Pont de la Vachette (1984-1985) Pont de Pirou (1991)
Plus de 50 ans	Pont Blondel (1964) Pont de la Bruche (1947) Palais d'Iéna à Paris (1937) Bourse de Bordeaux (1935-1938) Barrage de Vezins (1929-1932) Pont de Boutiron (1913)	Quai des TCD (1965) Pont X ^(*) (1954)	Pont de Vallières (1926)

* La structure maritime X et le pont X sont des ouvrages rendus volontairement anonymes pour des raisons de confidentialité.

de constituer une base de données d'indicateurs de durabilité (porosité à l'eau, diffusion des chlorures, perméabilité au gaz, carbonatation accélérée, etc.) et de témoins de durée de vie (profils de pénétration des chlorures, profondeurs de carbonatation, potentiels d'électrodes, résistivité, présence de désordres, etc.).

2- Ferrailage typique dans une section transversale du pont de Boutiron.

2- Typical reinforcement in a cross section of Boutiron Bridge.

Une analyse approfondie de toutes les données recueillies sur ces ouvrages a été effectuée en se basant sur les modèles de corrosion développés au sein du projet ANR MODEVIE, eux-mêmes dérivés des modèles développés par la fib. La méthodologie suivie est décrite en détail dans les références et nous

nous contentons ici d'en rappeler les grandes lignes. Les ouvrages concernés sont soit atteints de corrosion par carbonatation ou par attaque des chlorures, soit soumis au gel (avec ou sans sels de déverglaçage). Seuls des ouvrages situés dans les environnements XC, XS et XD sont donc étudiés. Les ouvrages ont été répartis (en fonction de leur âge) entre les 3 catégories suivantes :

- Ouvrages âgés de moins de 20 ans : en privilégiant les ouvrages qui ont déjà fait l'objet si possible d'une démarche performantielle de la durabilité ;
- Ouvrages d'âge compris entre 20 et 50 ans : en privilégiant des ouvrages ayant fait l'objet d'un diagnostic de moins de 5 ans ;
- Ouvrages âgés de plus de 50 ans : en privilégiant également des ouvrages ayant fait l'objet d'un diagnostic de moins de 5 ans.

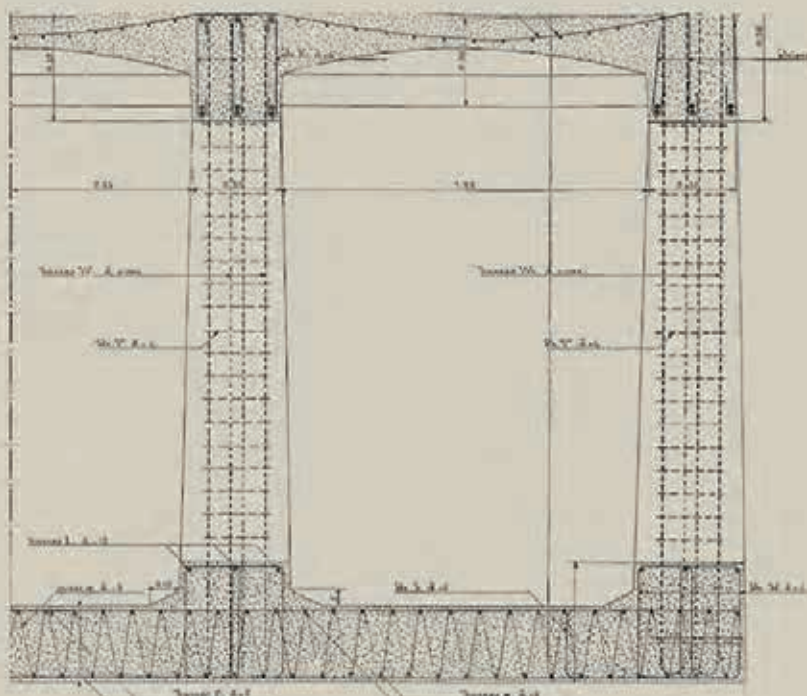
À ces ouvrages s'ajoutent les corps d'épreuves BHP 2000 qui ont également fait l'objet pendant le projet de mesures d'indicateurs de durabilité et de témoins de durée de vie. L'ensemble des ouvrages étudiés est listé dans le tableau 1 et classé par âge et par classe d'exposition.

Les principales données obtenues sur les ouvrages anciens sont les ou les types d'environnement passé et présent, les données déjà disponibles sur les ouvrages (dont la formulation du béton), les divers rapports d'inspection détaillée, les réparations effectuées, les indicateurs de durabilité mesurés à l'heure actuelle (porosité accessible à l'eau, perméabilité au gaz, coefficient de diffusion apparent des chlorures, résistivité électrique, absorption d'eau par capillarité, carbonatation accélérée et si possible teneur en Ca(OH)₂, ainsi que les témoins de durée de vie (profondeur de carbonatation, profil de chlorures, profil de sulfates, profondeur d'enrobage, potentiels d'électrode, résistivité électrique et état de corrosion des armatures).

Pour les ouvrages en classe d'exposition XF, les indicateurs suivants ont été ajoutés : le facteur d'espacement des bulles d'air, l'expansion selon l'essai de gel interne, le rapport des carrés des fréquences de résonance et l'écaillage.

Les carottes pour mesurer les indicateurs de durabilité ont été prélevées dans les zones des ouvrages où le diagnostic de l'état de corrosion avait été fait.

FERRAILLAGE TYPIQUE DANS UNE SECTION TRANSVERSALE DU PONT DE BOUTIRON





3



4

Elles ont été prélevées le plus possible à cœur des pièces pour s'affranchir des effets de l'environnement extérieur (carbonatation, pénétration des chlorures, etc.).

Trois carottes étaient prélevées par zone étudiée de façon à pouvoir faire des moyennes sur 3 mesures ; elles avaient un diamètre minimal de 95 mm et une longueur minimale de 20 cm, sauf pour les deux monuments historiques où des carottes de 50 mm de diamètre ont été prélevées après avoir vérifié expérimentalement que les essais de durabilité restaient valides.

EXEMPLES D'OUVRAGES ETUDIÉS

LE PONT DE BOUTIRON

L'ouvrage le plus ancien est le pont de Boutiron construit par Freyssinet en 1913 sur l'Allier (figure 1).

La structure est constituée d'un arc en béton armé et d'un treillis sous une dalle supportant la chaussée.

L'ouvrage de 207,50 m de long comprend trois travées de 67,60 m, 72,30 m et 67,60 m de long. Chaque travée est composée de deux demi-arcs réunis par une articulation au milieu. La hauteur du tablier est de

3- Vue de l'aile Sud du Palais d'Iéna.

4- Vue du môle d'accès Sud du quai des TCD.

5- Coupe transversale du quai des TCD.

3- View of the South wing of the Palais d'Iéna.

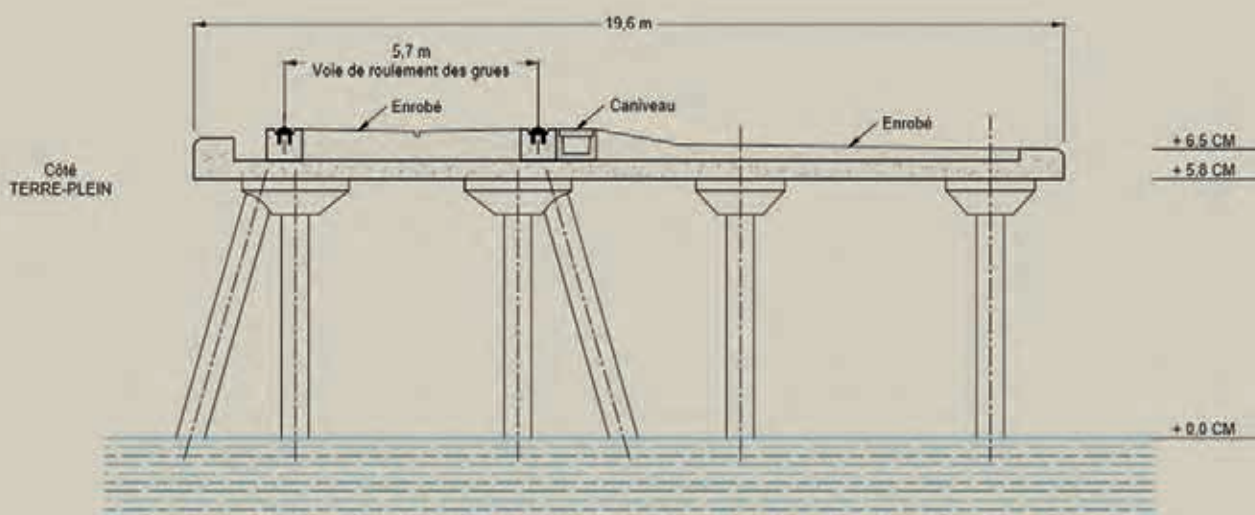
4- View of the South entrance breakwater of the "TCD" quay (loading terminal).

5- Cross section of the TCD quay.

5,50 m sur les piles et de 0,50 m à mi-portée.

La zone d'investigation est située au niveau de la dalle inférieure du demi-arc de rive, à proximité immédiate de la culée Est ; l'épaisseur de la dalle inférieure est de 40 cm dans la zone d'investigation. La disposition des armatures dans la dalle inférieure de l'arc est très particulière, comme le montre la figure 2 où l'on observe un renforcement par des aciers inclinés de diamètre 4 mm appelés "spires" sur le plan. Cette disposition des armatures dans la dalle empêche tout prélèvement

COUPE TRANSVERSALE DU QUAÏ DES TCD



5

de béton sans armature et complique la mesure des indicateurs de durabilité. Néanmoins, si l'on prend en compte les résultats, la durabilité potentielle du béton apparaît très faible (porosité à l'eau de 16,4 %, Kgaz supérieur à 200 10⁻¹⁸ m²), malgré le fait que le pont soit dans un bon état général de conservation pour un pont aussi ancien de plus de 100 ans. Des éclats de béton et des aciers apparents corrodés existent en certains points répartis sur l'ensemble de l'ouvrage, et cela est dû à un enrobage de béton localement défectueux (moins de 20 mm). La classe de résistance à la compression du béton de l'arc inférieur correspond à un C45/55, ce qui est une très bonne valeur pour un béton aussi ancien qui comprend 410 kg de ciment de type CEM I par mètre cube de béton. Le plus surprenant est la profondeur de carbonatation mesurée qui est inférieure à 1 mm sur la zone étudiée de l'arc.

Les investigations menées sur les trois zones de contreventement du pont de Boutiron montrent des enrobages de béton supérieurs à 45 mm, des résistivités très élevées, à l'exception d'une zone localisée correspondant à un béton ségrégué, et des potentiels électriques positifs indiquant que les armatures sont passivées. Les investigations non destructives indiquent que les armatures sont bien protégées, implantées dans un béton peu sensible à la corrosion et essentiellement passivées.

LE PALAIS D'ÉNA

Le Palais d'Éna, aussi connu sous le nom de Musée des Travaux Publics, a été conçu par Auguste Perret dans le cadre du plan d'urbanisme de l'Exposition internationale "Arts et Techniques dans la Vie Moderne" de Paris en 1937. En 1959, le Conseil Économique et Social s'y installe. L'aile Sud du Palais d'Éna est la première phase de construction, bâtie entre 1937 et

1938 par la "Société des grands travaux en béton armé", entreprise de Gustave Perret. Elle est classée Monument Historique. Ce monument a déjà été en partie ou totalement restauré, et présente des dossiers de diagnostic assez complets et récents.

L'aile Sud du Palais d'Éna, élevée sur deux étages, est un bâtiment de 80 m de long, 20 m de large et 20 m de haut (figure 3). La façade Sud de l'aile est composée de douze travées dont neuf avec des colonnes monumentales de 13 m de hauteur, espacées tous les 6 m. Elle est située dans un environnement XC4.

Des carottages de 51 mm de diamètre ont été réalisés dans les travées 18 et 19 de la façade Sud en juillet 2016, selon deux zones : une zone dite "non corrodée" (NC) où aucune altération n'avait été identifiée, et une zone dite "corrodée" (C) réparée à de nombreuses reprises.

Les principaux résultats des investigations réalisées ont été les suivants :

→ Le béton utilisé au palais d'Éna est composé d'un ciment Portland au laitier, qui correspondrait, par rapport à la classification actuelle, à un ciment de type CEM II/B-S. Si le dosage en ciment respecte les limites actuellement fixées par la norme NF EN 206/CN pour les classes d'exposition XC1 à XC4, en revanche, le rapport Eeff/C compris entre 0,75 (Zone NC) et 0,8 (Zone C) dépasse significativement le seuil de 0,65 ou 0,60 fixé pour ces mêmes classes.

→ Les indicateurs de durabilité sont proches pour les deux zones. La porosité à l'eau est égale à 18,3% pour la zone NC et à 19% pour la zone C. Les valeurs de perméabilité à l'oxygène présentent une forte disparité, comprises pour la zone NC entre 650 et 1 008 10⁻¹⁸ m², et pour la zone C entre 402 et 1 154 10⁻¹⁸ m². Les valeurs de ces indica-

teurs correspondent à un béton de classe de durabilité très faible.

→ Les profondeurs de carbonatation sont légèrement plus élevées et plus hétérogènes pour la zone NC avec une profondeur de carbonatation moyenne de 35 mm, que pour la zone C avec une profondeur moyenne de 30 mm.

→ Les dégradations observées sur la partie dite "corrodée" sont probablement dues au faible enrobage des armatures sur cette zone (sondage à 2,2 cm en 2013), comparé à l'enrobage de la zone dite "non corrodée", avec des enrobages à plus de 12,5 cm.

LE QUAI DES TCD À LORIENT

Le quai des TCD, construit au cours des années 1964 et 1965, est utilisé pour l'armement des navires. Il s'agit d'un appontement composé de trois parties : une partie principale présentant un linéaire accostable de 180 m de long, un môle d'accès Sud long de 109,34 m (figure 4) et un retour Nord long de 52,11 m.

Le tablier est constitué d'une dalle en béton armé de 42 cm d'épaisseur et repose sur des pieux métalliques verticaux et obliques au moyen de champignons de couronnement en béton armé (figure 5). Cette dalle est surmontée d'une structure de chaussée de 25 cm côté mer et de 50 cm côté terre.

Le tablier a une largeur de 19,60 m en partie courante et présente une pente transversale de 1,5% environ. L'ouvrage est situé en environnement marin (XS3). L'intrados du tablier est exposé aux embruns. Par fort coefficient de marée, il peut être exposé à des éclaboussures.

Les investigations menées sur l'intrados de la dalle du môle Sud du quai des TCD ont conduit aux résultats suivants :

→ Le risque de corrosion dû à la carbonatation est nul (profondeur de carbonatation de l'ordre du mm) ;

→ Le principal risque de dégradation est la corrosion due aux chlorures de l'eau de mer ; la profondeur moyenne du front de chlorure est de 30 mm après 50 ans. Compte tenu des enrobages mesurés (en moyenne 40 mm pour les armatures longitudinales et 58 mm pour les armatures transversales), respectivement 18% et 0% des armatures longitudinales et transversales seraient situées dans un béton pollué par des chlorures et donc susceptible d'être dépassivées ;

→ Les valeurs mesurées des indicateurs de durabilité ($D_{rcm} = 4,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $P_{eau} = 12,8 \%$, $K_{gaz} = 89 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$) indiquent un béton de classe de durabilité potentielle "Moyenne" à "Élevée" selon les critères de l'Afgc 2004, ce qui pourrait correspondre à une durée de vie prévisible d'environ 100 ans ;

→ Les mesures de potentiel d'électrode indiquent un risque de corrosion faible à modéré : les résistivités mesurées in situ sont comprises entre 50 et 100 kOhm.cm, ce qui correspond à un faible risque de corrosion, et les gradients de potentiel n'identifient pas clairement de zones anodiques.

PRINCIPAUX RÉSULTATS OBTENUS À L'ISSUE DU PROJET

RELATION EN VITESSE DE CARBONATATION NATURELLE ET VITESSE DE CARBONATATION ACCÉLÉRÉE

L'analyse est basée sur le modèle de carbonatation développé dans le cadre du projet PerfDuB, en lien avec l'ANR MODEVIE. Connaissant la profondeur de carbonatation mesurée à l'âge t sur la structure investiguée, l'humidité relative moyenne du site et le nombre de jours de pluie par an, par analyse inverse il est possible de calculer la vitesse naturelle de carbonatation V_{nat} . Par ailleurs, ayant mesuré les vitesses de carbonatation accélérée V_{acc} sur des carottes prélevées dans les ouvrages, il est alors possible de calculer le ratio V_{nat}/V_{acc} pour une partie des structures investiguées (tableau 2). On obtient alors une valeur moyenne de 2,7 (mm/an)^{0,5}, qui est cohérente avec la valeur de 3,0 obtenue lors des essais sur les 42 bétons de laboratoire du PN PerfDuB.

À partir des mesures de carbonatation accélérée réalisées sur carottes, on peut en déduire la valeur de carbonatation naturelle correspondante, ▷

TABLEAU 2 : DÉTERMINATION DES RATIOS V_{NAT}/V_{ACC}

Structure	V_{NAT} (mm/an) ^{0,5} calculée	V_{ACC} (mm/jour) ^{0,5} mesurée	Ratio V_{NAT}/V_{ACC} (jour/an) ^{0,5}
Vachette culée	2,85	1,19	2,4
St-Poncy	4,37	2,13	2,1
Bruche (zone corrodée)	4,47	1,44	3,1
Blondel chevêtre	4,85	1,55	3,1
Moyenne : 2,7			

en utilisant la relation proposée dans le cadre des études de laboratoire du PN PerfDuB ($V_{nat} = 3,015 \times V_{acc}$).

La valeur du paramètre p de la loi de puissance peut alors être obtenue à partir des valeurs calculées de V_{nat} et de la mesure de la profondeur de carbonatation à un âge donné. Les valeurs obtenues pour p varient de 0,38 à 0,55, avec une moyenne à 0,48. Elles sont cohérentes avec la valeur généralement admise de 0,5.

PRINCIPALES CONCLUSIONS SUR LES SEUILS À RETENIR POUR LA CARBONATATION

Le tableau 3 présente les valeurs des indicateurs de durabilité qui peuvent être considérées comme des valeurs suffisantes (mais non nécessaires) pour obtenir des structures saines avec les valeurs d'enrobages concernées.

Les données expérimentales sont cohérentes avec une loi de carbonatation ayant une valeur de 0,5 pour le paramètre de puissance p .

L'utilisation du facteur de cure k_c comme facteur multiplicatif dans le modèle de carbonatation n'est pas cohérente avec une partie des mesures réalisées sur ouvrages. Un terme additif, lié à l'impact de la cure sur la peau du béton, pourrait être plus approprié dans le modèle, et dans ce cas, le paramètre de puissance p devrait être diminué.

Pour de nombreuses structures anciennes, la perméabilité au gaz peut atteindre des valeurs très élevées, telles que 2000 ou 3000 10^{-18} m^2 . Ceci peut s'expliquer par le fait que les bétons anciens peuvent contenir des microfissures ou une fine fissure unique générant des fuites d'air à travers le béton testé. Le résultat d'essai n'est alors pas représentatif de la mesure de la perméabilité au gaz du matériau.

PRINCIPALES CONCLUSIONS SUR LES SEUILS À RETENIR POUR LE COEFFICIENT D_{RCM}

Le tableau 4 présente les valeurs du coefficient de diffusion des chlorures D_{RCM} obtenues sur ouvrages sains. Bien que ces structures soient assez jeunes, la valeur de $2,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ semble

compatible avec une Durée d'Utilisation de Projet de 50 ans pour les classes d'exposition XS3 et XD3.

Le tableau 5 présente les valeurs de D_{RCM} obtenues sur ouvrages dégradés. Les valeurs au-delà de $8,6 \cdot 10^{-12}$ sont incompatibles avec une Durée d'Utilisation de Projet de 50 ans pour la classe

d'exposition XS3. Les valeurs de facteur de vieillissement (qui régit l'évolution en fonction du temps du coefficient de diffusion des chlorures) obtenues sur des bétons de CEM I, sont comprises entre 0,25 et 0,27 pour nos ouvrages, ce qui est compatible avec la valeur tabulée de 0,30 du bulletin fib 34. □

TABLEAU 3 : INDICATEURS DE DURABILITÉ POUR LA CARBONATATION MESURÉS SUR STRUCTURES SAINES

DUP 50 ans				DUP 100 ans			
Porosité (%)	K_{gaz} (10^{-18} m^2)	V_{nat} ($\text{mm}/\text{a}^{0,5}$)	V_{acc} ($\text{mm}/\text{j}^{0,5}$)	Porosité (%)	K_{gaz} (10^{-18} m^2)	V_{nat} ($\text{mm}/\text{a}^{0,5}$)	V_{acc} ($\text{mm}/\text{j}^{0,5}$)
13,0 - 17,7	200 - 607	0,12 - 9,30	0,04 - 3,08	13,0 - 16,4	224 - 607	0,12 - 9,30	0,04 - 3,08

TABLEAU 4 : VALEURS DE $D_{RCM,10}$ ET $D_{RCM,t}$ MESURÉES SUR OUVRAGES SAINS

Ouvrage	Age (ans)	Classe d'exposition	Liant	$D_{RCM,10}$ (m^2/s)	$D_{RCM,t}$ (m^2/s)
Vasco de Gama	17,75	XS3	CEM I + CV (18%) CEM IV (25% CV)	$3,4 \cdot 10^{-12}$ $0,52 \cdot 10^{-12}$	$0,16 \cdot 10^{-12}$ $0,3 \cdot 10^{-12}$
Rion-Antirion	12,5	XS2 - XS3	CEM III/A PM ES	$0,86 \cdot 10^{-12}$	$0,37 \cdot 10^{-12}$ à $0,49 \cdot 10^{-12}$
Quai des TCD	51	XS3	CEM I		$2,3 \cdot 10^{-12}$
Chateaubriand	25	XS3	CEM I PM		$29 \cdot 10^{-12}$
Vachette	34	XF4 / XD3	CEM I		$28 \cdot 10^{-12}$
Ré	30	XS3, marnage	CEM II/A		$8,6 \cdot 10^{-12}$
Saint-Poncy	31	XF4 / XD3	CEM I		$41 \cdot 10^{-12}$
Pirou	28	XF4 / XD3	CEM I		$9,4 \cdot 10^{-12}$

TABLEAU 5 : VALEURS DE $D_{RCM,t}$ MESURÉES SUR OUVRAGES DÉGRADÉS

Ouvrage	Age (ans)	Classe d'exposition	Liant	$D_{RCM,t}$ (m^2/s)
Pont X	60	XS3	-	$10 \cdot 10^{-12}$

ABSTRACT

COLLECTION AND ANALYSIS OF DATA OBTAINED ON EXISTING STRUCTURES

BRUNO GODART, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL - MICHAËL DIERKENS, CEREMA

To set the threshold value for durability indicators, it is important to take into account the experience feedback that can be acquired regarding the actual behaviour of existing structures. As part of the PerfDuB National Project, 19 structures were selected and appraised in order to establish a database of durability indicators and service life benchmarks. Following a recap of the investigation methodology employed and a concise presentation of three examples of appraised structures, the article presents the main results obtained based on an in-depth analysis of the evolution of durability indicators conducted in parallel with an analysis of the condition of the structures, and taking into consideration the corrosion models developed as part of the ANR MODEVIE project. □

RECOGIDA Y ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS OBRAS EXISTENTES

BRUNO GODART, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL - MICHAËL DIERKENS, CEREMA

Para fijar el valor umbral de los indicadores de durabilidad, es importante tener en cuenta la experiencia acumulada sobre el comportamiento real de las obras existentes. En el marco del Proyecto Nacional PerfDuB, se han seleccionado y evaluado 19 obras para crear una base de datos de indicadores de durabilidad y testigos de vida útil. Tras un recordatorio de la metodología de investigación aplicada y una presentación resumida de tres ejemplos de obras evaluadas, el artículo presenta los principales resultados obtenidos, basados en un análisis en profundidad de la evolución de los indicadores de durabilidad, realizado en paralelo a un análisis del estado de las construcciones y que tiene en cuenta los modelos de corrosión desarrollados en el seno del proyecto ANR MODEVIE. □



BASE DE DONNÉES DU PN PERFDUB ET SES 42 BÉTONS CARACTÉRISÉS : QUELLES EXPLOITATIONS POSSIBLES ?

AUTEURS : SANDRINE CHANUT, RESPONSABLE MATÉRIAUX BÉTONS, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - MICHAEL DIERKENS, EXPERT BÉTON, CEREMA - JONATHAN MAI-NU, RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT DURABILITÉ DES OUVRAGES, CERIB - EMMANUEL ROZIÈRE, ENSEIGNANT-CHERCHEUR, ÉCOLE CENTRALE DE NANTES, GEM - PHILIPPE TURCRY, ENSEIGNANT-CHERCHEUR, IUT ET UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE LASIE

LE PROJET NATIONAL PERFDUB AVAIT POUR OBJECTIF DE DÉFINIR LA MÉTHODOLOGIE D'APPLICATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIÈRE DE LA DURABILITÉ. DANS CE PROJET, 42 BÉTONS DE COMPOSITIONS VARIÉES ONT ÉTÉ FORMULÉS, FABRIQUÉS ET CARACTÉRISÉS. L'EXPLOITATION DES RÉSULTATS A PERMIS D'ÉVALUER L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE COMPOSITION SUR LES PROPRIÉTÉS DE DURABILITÉ, D'UNE PART, ET DE CONTRIBUER À DÉFINIR DES SEUILS DE PERFORMANCE POUR LA JUSTIFICATION DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS, D'AUTRE PART.

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le Projet National PerfDuB avait pour objectif de définir une méthodologie pour justifier la durabilité des bétons par une approche basée sur leurs performances.

Une partie des travaux du PN PerfDuB a consisté à caractériser les propriétés de durabilité de 42 bétons réalisés avec plusieurs ciments et additions normalisés (ciment Portland, ciment Portland-

calcaire, ciment Portland-laitier, ciment de haut-fourneau, ciment composé avec du laitier, des cendres volantes, de la fumée de silice, du filler calcaire, du filler siliceux, du métakaolin), plusieurs natures de granulats (roulés, concassés, semi-concassés) de porosités différentes, et en considérant différents niveaux de compacité (rapport eau sur liant variant de 0,35 à 0,60) pour établir des liens entre les indicateurs

de durabilité et les paramètres de composition. Ces bétons couvrent toutes les classes d'exposition. Pour chaque classe d'exposition, la plupart des compositions de béton sont conformes aux dispositions prescriptives de la norme NF EN 206/CN (2014).

Certains bétons dérogent volontairement aux exigences prescriptives de la norme vis-à-vis de leur teneur en liant équivalent, du rapport eau efficace sur

liant équivalent ou du type de granulats. L'exploitation de la base de données permet de dégager des tendances et de mettre en évidence la corrélation, ou l'absence de corrélation, entre les propriétés de durabilité ainsi qu'entre les propriétés de durabilité et les paramètres de composition des bétons.

REPRÉSENTATIVITÉ DE LA BASE DE DONNÉES

La base de données comprend 42 bétons dont les compositions sont représentatives de l'expérience et de la pratique françaises en termes de bétons utilisés pour différentes applications dans les bâtiments et ouvrages de génie civil.

Dans la suite de l'article, et notamment dans le tableau 1, les bétons sont nommés comme suit : Numéro du béton - Type de ciment - Type d'addition - Teneur en addition dans le liant - Eau/Liant - Résistance moyenne à la compression à 28 jours mesurée sur 3 éprouvettes (110x220 mm). Par exemple, le nom "5_CEM I_S60_0,58_26" correspond au béton n°5 qui est réalisé avec du CEM I et du laitier (60% du liant). Son rapport Eau/Liant est égal à 0,58 et sa résistance moyenne $f_{cm,cyl,28}$ à 26 MPa.

Le tableau 1 synthétise les 42 bétons étudiés dans le PN PerfDuB.

TABLEAU 1 : LISTE DES 42 BÉTONS DE LA BASE DE DONNÉES DU PN PERFDUB

1_CEM I_0,59_43	15_CEM I_0,48_62	29_CEM I_S60_0,42_70
2_CEM I_V30_0,52_33	16_CEM II/A-S_0,5_50	30_CEM I_V30_0,35_64
3_CEM II/A-LL_0,6_41	17_CEM III/A_0,5_47	31_CEM III/A_0,4_67
4_CEM III/A_0,63_37	18_CEM I_V37_0,53_56	32_CEM I_S50_0,33_90
5_CEM I_S60_0,58_26	19_CEM II/A-S_0,5_60	33_CEM III/A_0,45_52
6_CEM I_L30_0,46_34	20_CEM II/A-S_0,5_59	34_CEM III/A_0,45_59
7_CEM I_L41_0,39_42	21_CEM I_L30_0,39_57	35_CEM V/A (S-V)_0,45_66
8_CEM II/A-LL_V30_0,53_31	22_CEM II/A-LL_0,49_57	36_CEM V/A (S-V)_0,45_49
9_CEM II/A-LL_S45_0,57_31	23_CEM II/A-S_0,49_46	37_CEM V/A (S-V)_0,45_56
10_CEM II/A-LL_0,61_32	24_CEM II/A-S_0,5_44	38_CEM I_D8_0,38_94
11_CEM II/A-LL_0,54_50	25_CEM I_0,5_50	39_CEM I_M20_0,43_62
12_CEM I_S60_0,55_46	26_CEM I_0,45_46	39b_CEM I_M20_0,42_66
13_CEM I_L30_0,42_39	27_CEM I_S50_0,43_68	40_CEM I_Qz30_0,49_28
14_CEM I_0,55_38	28_CEM I_0,45_66	41_CEM I_M20_0,35_93

1- Répartition des bétons par classe de résistance mécanique - nombre de bétons dans chacune des classes de résistance mécanique.

1- Breakdown of concretes by mechanical strength class - number of concretes in each of the mechanical strength classes.

La répartition des bétons par classe de résistance mécanique est présentée dans la figure 1.

Les figures 2 à 4 présentent une cartographie des propriétés de durabilité des 42 bétons en termes de porosité accessible à l'eau, vitesse de carbonatation accélérée et coefficient de diffusion des ions chlorure obtenue par migration sous champ électrique. Ces cartographies illustrent la large gamme de bétons étudiée tant du point de vue de leur composition que de l'étendue de leurs performances.

ESSAIS RÉALISÉS

Tous les bétons ont été caractérisés avec les essais suivants :

→ À l'état frais :

- Affaissement selon NF EN 12350-2 à t_0+5 minutes, t_0+30 minutes, t_0+60 minutes et t_0+90 minutes ;
- Pour le BAP : étalement selon NF EN 12350-5 et stabilité au tamis à T_0+5 minutes et T_0+60 minutes ;
- Masse volumique selon NF EN 12350-6 ;
- Teneur en air occlus selon NF EN 12350-7.

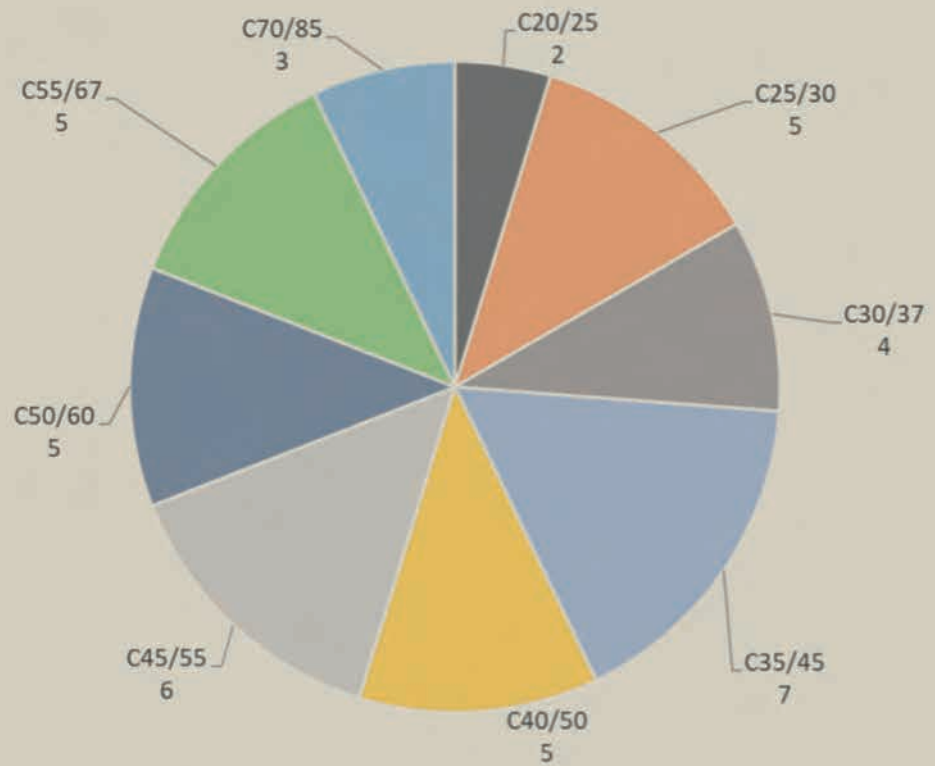
→ À l'état durci :

- Résistance à la compression selon NF EN 12390-3 à 24 heures, 7 jours, 28 jours et 90 jours ; trois éprouvettes cylindriques (110x 220 mm) ont été testées à chaque échéance ;
- Propriétés de durabilité selon le tableau 2.

Les modes opératoires des essais du tableau 2 ont fait l'objet d'un travail de consolidation et, au besoin, de modifications, par un groupe spécifique du PN PerfDuB sur la base de protocoles existants (Évaluation des performances des bétons : de l'amélioration d'essais de durabilité existants à la définition de nouveaux protocoles).

RÉPARTITION DES BÉTONS PAR CLASSE DE RÉSISTANCE MÉCANIQUE

Nombre de bétons dans chacune des classes de résistance mécanique



1

© JONATHAN MAI-NHU

TABLEAU 2 :

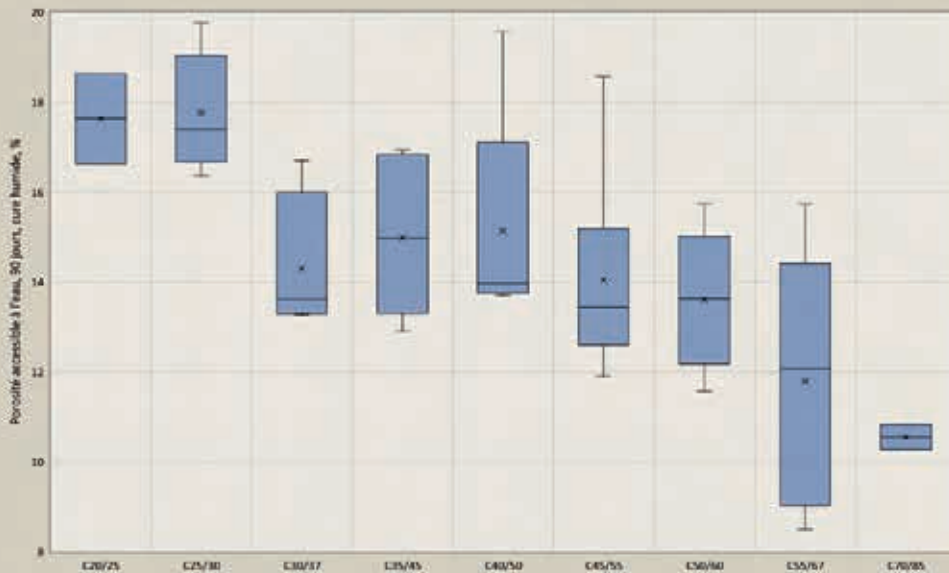
LISTE DES ESSAIS RÉALISÉS SUR LES 42 BÉTONS DE LA BASE DE DONNÉES DU PN PERFDOB

	Propriétés	Cure humide	Cure sèche	Échéance d'essais (jours)
Pour tous les bétons	Perméabilité au gaz Cembureau	X		28, 90
	Porosité accessible à l'eau	X		28, 90
	Absorption d'eau par capillarité	X	X	28, 90
	Absorption d'eau par immersion	X		28, 90
	Diffusion de l'oxygène	X		28, 90
	Migration des ions chlorure	X		28, 90
	Résistivité électrique	X		28, 90
	Carbonatation naturelle	X	X	90
	Carbonatation accélérée (50% de CO ₂)	X	X	90
	Carbonatation accélérée selon NF EN 12390-12 (avec le préconditionnement PerfDuB)	X	X	90
Pour certains bétons	Perméabilité au gaz Torrent	X		28, 90
	Perméabilité au gaz sur des éprouvettes de diamètre 50 mm	X		
	Biodégradation	X		
	Lixiviation à pH constant	X		
	Attaque sulfatique externe	X		
	Coefficient de diffusion naturelle des ions chlorure	X		90

© JONATHAN MAI-NHU

CARTOGRAPHIE DES 42 BÉTONS

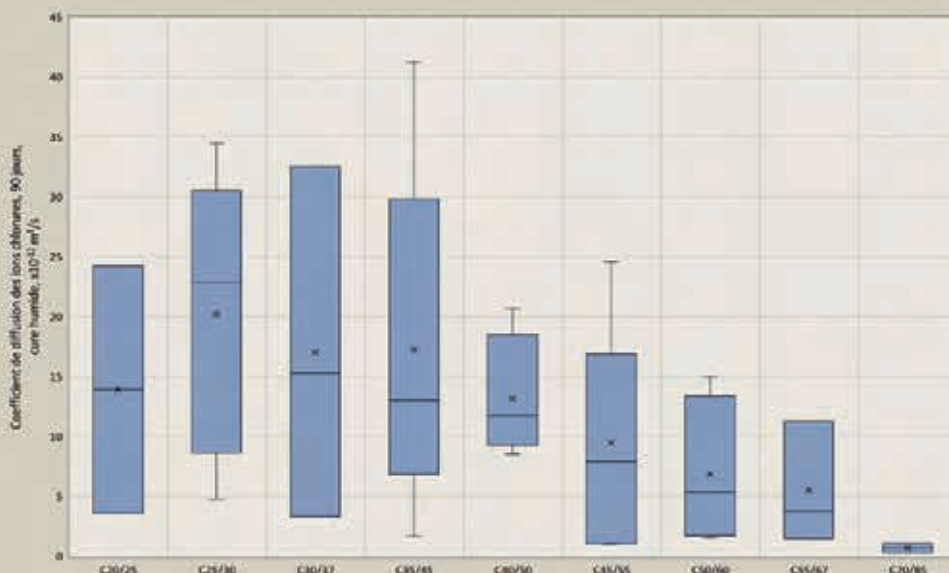
Porosité accessible à l'eau - valeurs moyennes



© JONATHAN MAILNHU 2

CARTOGRAPHIE DES 42 BÉTONS

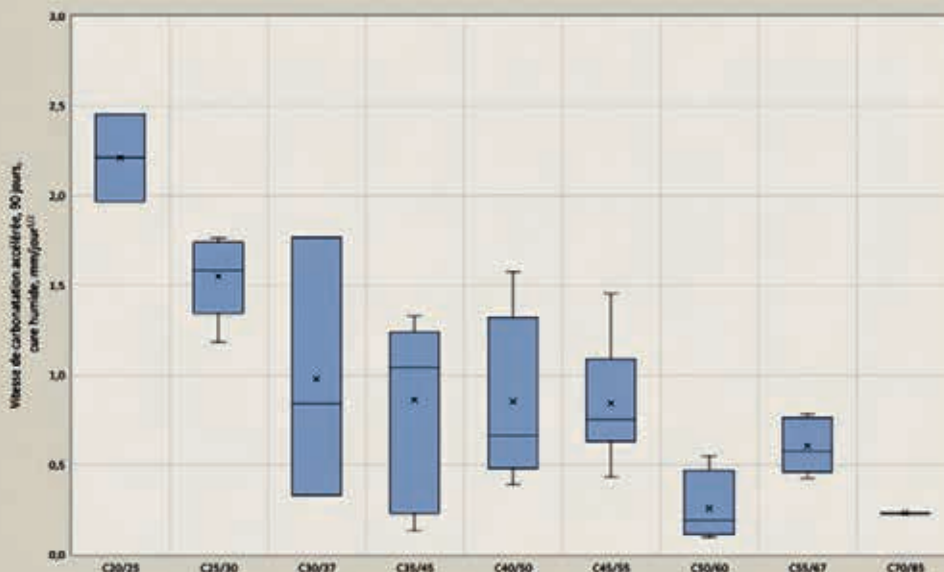
Coefficient de migration des ions chlorure - valeurs moyennes



© JONATHAN MAILNHU 3

CARTOGRAPHIE DES 42 BÉTONS

Vitesse de carbonatation accélérée selon le mode opératoire EN 12390-12 (incluant le préconditionnement alternatif du PN PerfDuB) - valeurs moyennes



© JONATHAN MAILNHU 4

2- Cartographie des 42 bétons - porosité accessible à l'eau - valeurs moyennes.

3- Cartographie des 42 bétons - coefficient de migration des ions chlorure - valeurs moyennes.

4- Cartographie des 42 bétons - vitesse de carbonatation accélérée selon le mode opératoire EN 12390-12 (incluant le préconditionnement alternatif du PN PerfDuB) - valeurs moyennes.

2- Map of the 42 concretes - porosity accessible to water - mean values.

3- Map of the 42 concretes - coefficient of migration of chloride ions - mean values.

4- Map of the 42 concretes - speed of accelerated carbonation according to the EN 12390-12 operating procedure (including the alternative preconditioning of the PerfDuB National Project) - mean values.

QUELQUES RÉSULTATS

De nombreuses analyses ont été menées dans le cadre du projet. Quelques résultats de l'exploitation des données sont présentés ci-après.

LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU

L'influence de la porosité des granulats sur la porosité accessible à l'eau a été investiguée.

Les granulats utilisés pour la fabrication des 42 bétons ont des coefficients d'absorption d'eau différents selon leur origine. Les granulats G2 ont un coefficient d'absorption d'eau de 2,5 % et les granulats G4 ont un coefficient d'absorption d'eau de 4 %. Pour les granulats G1, G3, G5, le coefficient d'absorption d'eau est égal ou inférieur à 1 %.

L'analyse de la porosité des bétons est réalisée par groupe de bétons défini par rapport aux classes de résistance à la compression. Ils sont proposés afin d'analyser la distribution de la porosité à l'eau avec le coefficient d'absorption par immersion (figure 6) :

- Set A :
C20/25, C25/30, C30/37 ;
- Set B :
C35/45, C40/50, C45/55 ;
- Set C :
C50/60, C55/67, C70/85.

La figure 5 illustre la bonne corrélation entre la porosité accessible à l'eau et l'absorption d'eau.

L'essai de porosité accessible à l'eau donne un résultat exprimé en pourcentage volumique alors que l'essai d'absorption d'eau donne un coefficient exprimé en pourcentage massique.

Un lien entre les deux grandeurs peut être établi en utilisant la masse volumique du béton dans la mesure où les deux grandeurs appréhendent la même caractéristique du béton.

Les résultats présentés en figures 5 et 6 mettent en évidence l'influence de l'absorption d'eau des granulats sur la porosité à l'eau du béton.

Pour les bétons de classes de résistance à la compression supérieures à C50/60, la porosité à l'eau des bétons est inférieure à 14%, quels que soient les autres paramètres de composition, sauf en cas d'utilisation de granulats

à 2,5% et 4% d'absorption d'eau. Pour ces bétons, les valeurs de porosité à l'eau sur béton varient entre 15,8% (granulats à 2,5% d'absorption d'eau) et 18,6% (granulats à 4% d'absorption d'eau).

Plus de 90% des bétons comportant des granulats à forte absorption ont

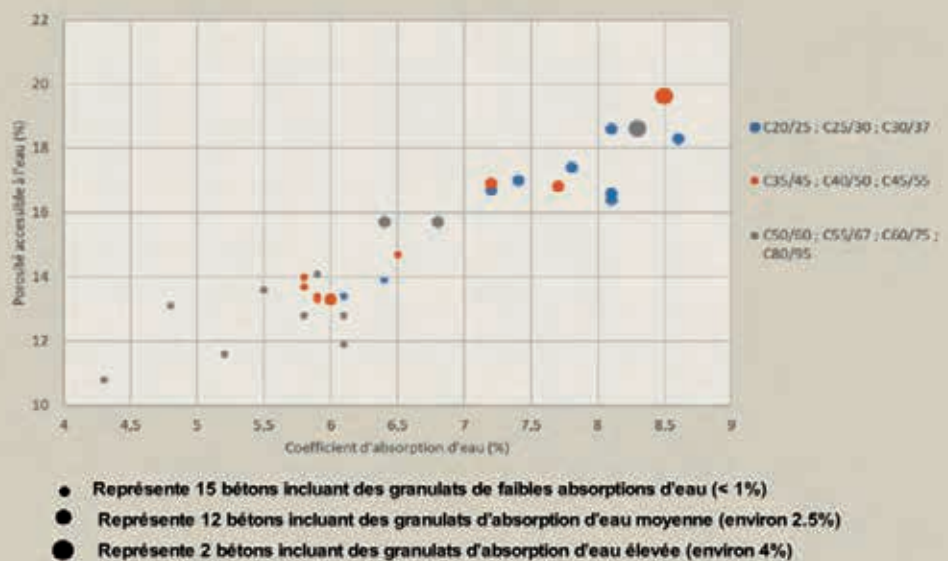
une porosité à l'eau mesurée supérieure à 15%, quelle que soit la classe de résistance à la compression.

Tous les bétons réalisés avec les granulats G1, G3 et G5 ont une porosité d'absorption d'eau inférieure à 15,5%, quelle que soit la classe de résistance à la compression.

LA PERMÉABILITÉ APPARENTE AU GAZ

L'exploitation des résultats des 42 bétons met en avant l'absence de corrélation directe entre la perméabilité au gaz et les autres propriétés de durabilité, en particulier avec la porosité et la vitesse de carbonatation accélérée

POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU EN FONCTION DE L'ABSORPTION D'EAU À 90 JOURS

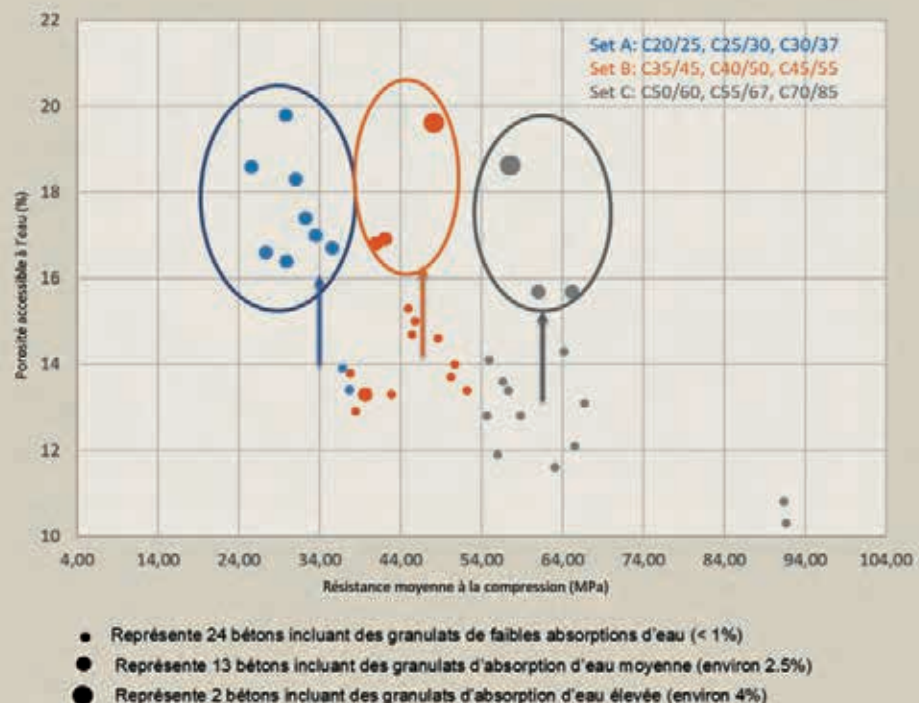


5

© JONATHAN MAI-NHU

DISTRIBUTION DE LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU EN FONCTION DE LA CLASSE DE RÉSISTANCE MÉCANIQUE

Influence de l'absorption d'eau des granulats



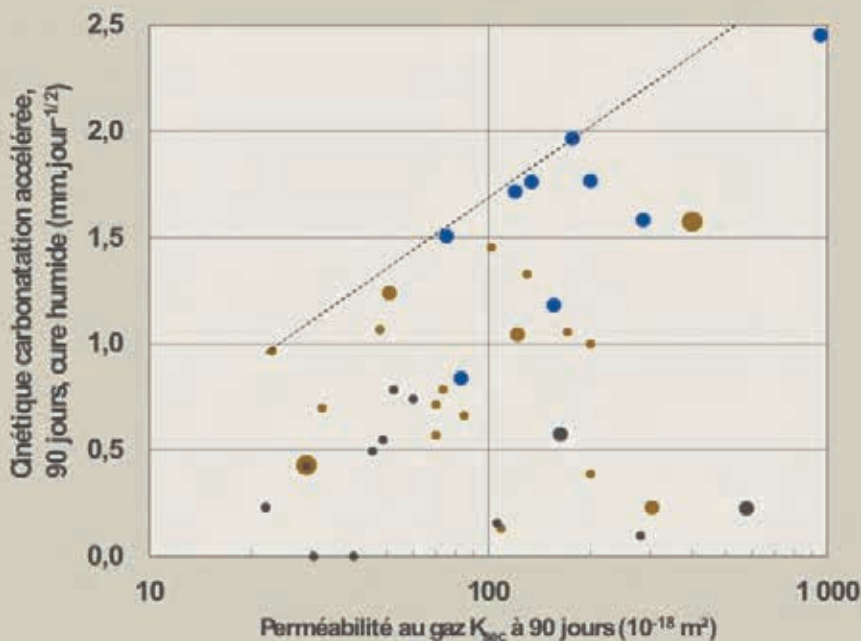
6

© JONATHAN MAI-NHU

5- Porosité accessible à l'eau en fonction de l'absorption d'eau à 90 jours.
6- Distribution de la porosité accessible à l'eau en fonction de la classe de résistance mécanique - Influence de l'absorption d'eau des granulats.

5- Porosity accessible to water as a function of water absorption at 90 days.
6- Distribution of the porosity accessible to water as a function of the mechanical strength class - Influence of water absorption from aggregates.

ILLUSTRATION DE L'ABSENCE DE CORRÉLATION ENTRE LA CINÉTIQUE DE CARBONATATION ACCÉLÉRÉE ET LA PERMÉABILITÉ AU GAZ



© EMMANUEL ROZIERE
7

(figure 7). Chaque propriété décrit le béton d'un point de vue spécifique. La perméabilité caractérise la porosité connectée ; elle est a priori moins sensible aux variations de volume poreux global influencées par des granulats d'absorption élevée par exemple.

La perméabilité apparente ne prend pas en compte les réactions chimiques qui altèrent les produits d'hydratation, lors de la pénétration des chlorures et de la carbonatation. Les propriétés de durabilité étudiées sont ainsi associées à différents phénomènes et paramètres de la microstructure.

Les faibles corrélations entre les données expérimentales permettent de conclure qu'il n'est pas possible de justifier des valeurs seuils pour la carbonatation fondées sur des valeurs de perméabilité au gaz.

LA CARBONATATION ACCÉLÉRÉE

Pour comparer les propriétés de durabilité des 42 bétons, les bétons sont regroupés en 3 groupes en fonction de la teneur en clinker du liant (figure 8) :

→ Le premier groupe (entouré en rouge sur la figure 8) comprend les bétons dont la teneur en clinker est comprise entre 78 % et 99 %. Il correspond aux bétons réalisés avec CEM I avec ou sans addition de calcaire, CEM II/A-LL, CEM II/A-S avec ou sans addition calcaire,

7- Illustration de l'absence de corrélation entre la cinétique de carbonatation accélérée et la perméabilité au gaz.

7- Illustration of the absence of correlation between the kinetics of accelerated carbonation and permeability to gas.

CEM I + fumée de silice, CEM I + métakaolin. Le béton 7 (béton auto-plaçant avec un fort volume de pâte et une forte proportion de clinker) a été intégré au groupe 1.

→ Le deuxième groupe (en vert sur la figure 8) comprend les bétons à teneur en clinker comprise entre 60 % et 70 %. Il correspond aux bétons réalisés avec CEM I + cendres volantes, CEM I + calcaire, CEM I + addition siliceuse.

→ Le troisième groupe (en bleu sur la figure 8) comprend les bétons à teneur en clinker comprise entre 30 % et 60 %. Il correspond aux bétons réalisés avec CEM I + calcaire, CEM I + laitier, CEM III/A, CEM V, CEM II/A-LL + cendres volantes, CEM II/A-LL + laitier.

La figure 9 illustre le lien entre les vitesses de carbonatation naturelle et les vitesses de carbonatation accélérée. Le coefficient de corrélation est trouvé égal à 3.

À partir de cette régression linéaire, la vitesse de carbonatation naturelle peut être estimée à partir d'une vitesse déterminée avec l'essai accéléré réalisé selon la norme expérimentale XP P 18-458 (2022).

L'essai de carbonatation accélérée peut ainsi fournir un paramètre d'entrée de modèles de prédiction de la carbonatation naturelle.

Si la seule différence entre carbonatation naturelle et carbonatation accélérée était la concentration ambiante en CO₂, le rapport de la vitesse de carbonatation naturelle et la vitesse accélérée serait en théorie égal à environ 2,5 (en prenant pour le calcul une concentration atmosphérique en CO₂ égale à 0,05 %). Le ratio obtenu de 2,5 est proche du coefficient de corrélation d'environ 3 trouvé avec les données de projet PerfDuB.

En fait, la concentration en CO₂ n'est pas la seule différence entre les deux méthodes de carbonatation. L'état hydrique initial, par exemple, n'est pas le même puisque les éprouvettes sont séchées à l'étuve avant la carbonatation accélérée, alors que séchage et carbonatation sont des phénomènes

concomitants en conditions d'essai naturelles.

De plus, pendant la carbonatation, l'humidité relative (HR) est de 65 % pour l'essai accéléré alors que l'humidité ambiante est d'environ 50 % pour les conditions naturelles.

Un modèle pour évaluer l'influence de l'humidité relative sur la vitesse de carbonatation a été proposé lors du projet ANR Modevie (figure 10). Selon ce modèle, le rapport entre la vitesse à 50 % HR et la vitesse à 65 % HR est égal à 1,1. Le rapport théorique de 2,5 doit donc être multiplié par 1,1, ce qui le rapproche du coefficient expérimental de 3,0.

CONTRIBUTION POUR LA DÉFINITION DES VALEURS SEUILS DES PROPRIÉTÉS DE DURABILITÉ

La définition des critères de performance pour l'utilisation de l'approche performantielle telle que définie dans le fascicule FD P 18-480 d'octobre 2022 a reposé sur trois approches :

- L'exploitation des résultats de la base de données du PN PerfDuB ;
- Les travaux de modélisation du projet ANR Modevie et de PerfDuB ;
- L'exploitation des données obtenues sur 19 ouvrages anciens (ponts, quais, monuments historiques, barrages) pour lesquels les propriétés générales de durabilité ont été mesurées sur des carottes prélevées dans l'ouvrage (porosité à l'eau, diffusion des chlorures, perméabilité aux gaz, carbonatation, etc.) et d'autres indicateurs de durabilité ont été évalués in situ (profils de pénétration des chlorures, profondeurs de carbonatation, potentiels d'électrode, résistivité, présence de désordres, etc.).

Une autre exploitation de la base de données a donc consisté à identifier une population de bétons conformes aux exigences prescriptives de la norme NF EN 206/CN pour chacune des classes d'exposition étudiées. Dans cette population de béton, et pour chacune des grandeurs associées à la durabilité et des indicateurs de durabilité, une valeur seuil a été définie, notée $P_{dur,seuil\ BDD}$. Cette valeur seuil correspond à une valeur permettant d'accepter par approche performantielle 90 % des bétons de cette population (90 % des bétons présentent donc des propriétés au moins aussi bonnes que la valeur seuil $P_{dur,seuil\ BDD}$). La figure 11 illustre la définition de $P_{dur,seuil\ BDD}$ pour l'indicateur de durabilité "porosité".

8- Représentation schématique du choix des groupes de béton pour l'étude des propriétés de durabilité - les groupes sont basés sur l'évolution de la résistance à la compression et de la teneur en clinker dans le liant.

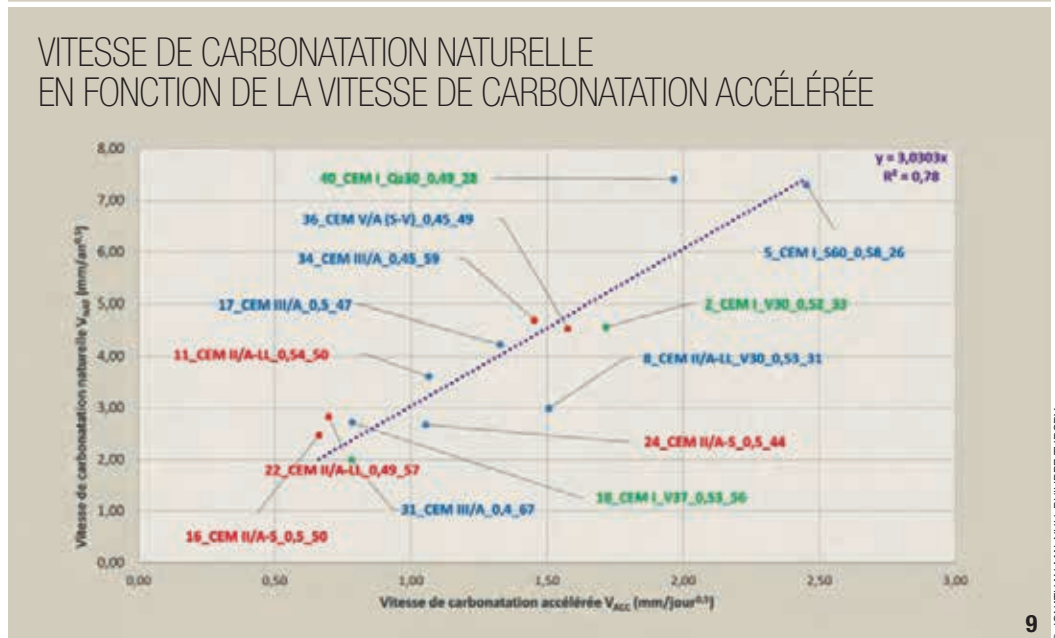
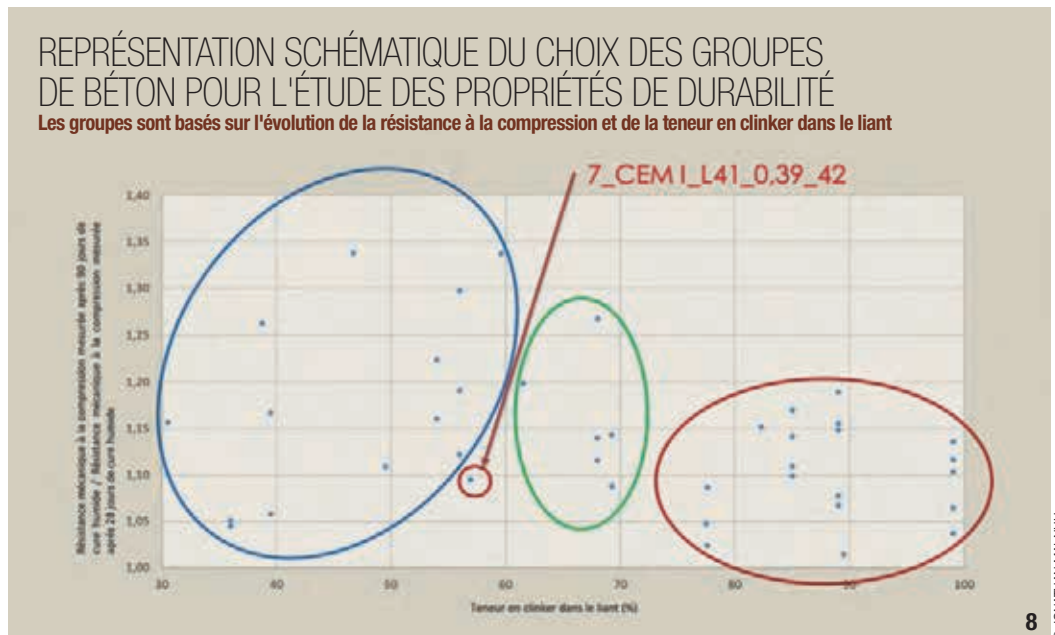
9- Vitesse de carbonatation naturelle en fonction de la vitesse de carbonatation accélérée.

10- Évolution du paramètre d'influence hydrique k_{RH} sur la cinétique de carbonatation en fonction de l'humidité relative HR.

8- Schematic representation of the choice of concrete groups for the investigation of durability properties - the groups are based on the evolution of compressive strength and clinker content in the binder.

9- Speed of natural carbonation as a function of the speed of accelerated carbonation.

10- Evolution of the hydric influence parameter k_{RH} on the carbonation kinetics as a function of relative humidity RH.



La valeur seuil caractéristique est ensuite déterminée à partir de la valeur moyenne $P_{dur,seuil} BDD$ en utilisant les hypothèses suivantes :

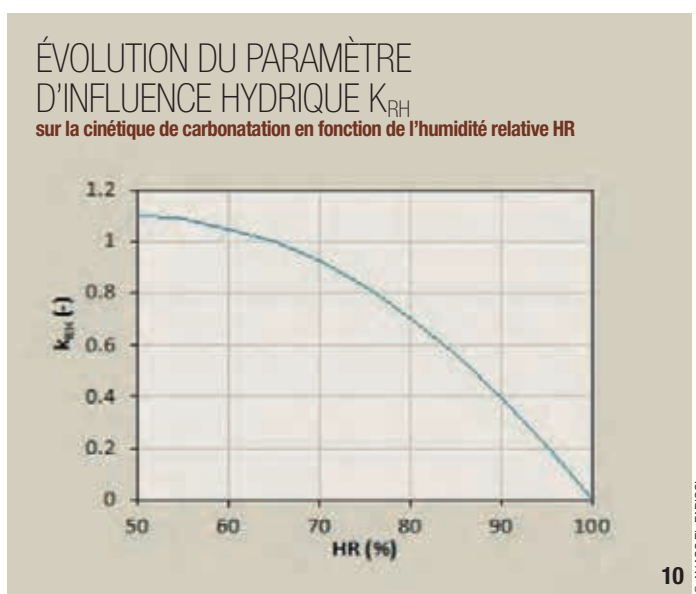
- Les distributions statistiques des propriétés de durabilité suivent des fonctions normales de densité de probabilité, même si cela reste discutable pour la profondeur de carbonatation ;
- Le coefficient de variation associé à chaque propriété de durabilité est égal à une valeur fixe déterminée à partir de retours d'expériences obtenus sur plusieurs chantiers.

La valeur caractéristique est calculée avec un fractile de 90 %, comme illustré sur la figure 12. Le coefficient 1,28 est le facteur Student qui correspond alors à 90 % de fractile.

Cette méthodologie a été appliquée pour chacune des classes d'exposition des tableaux NA.F de la norme NF EN 206/CN pour obtenir les critères de durabilité basés sur les 42 bétons. Les critères de durabilité obtenus par modélisation et investigations d'ouvrages anciens ont complété l'analyse pour aboutir aux valeurs actuellement utilisées dans le FD P 18-480 "justification de la durabilité des bétons par approche performantielle".

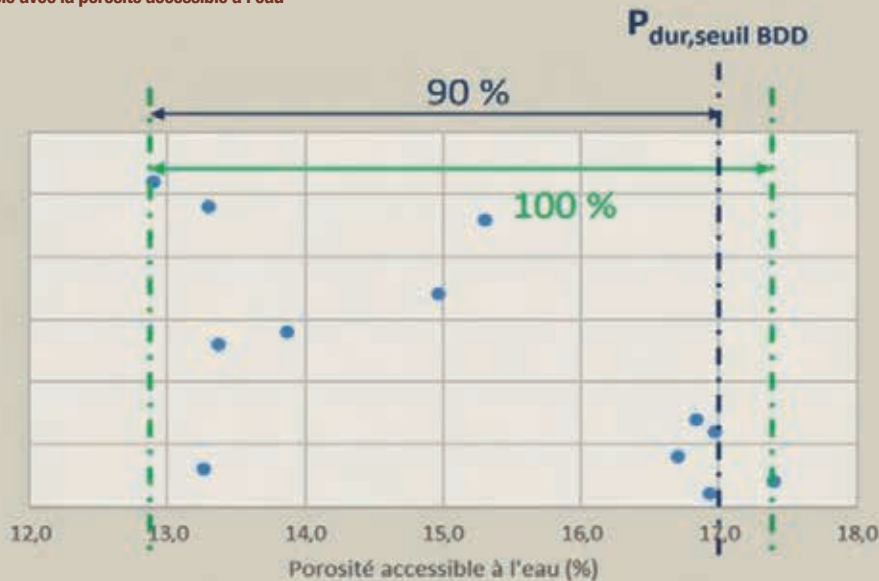
CONCLUSIONS

Au cours du Projet National PerfDuB, une vaste campagne d'essais a été menée sur 42 formulations de bétons représentatifs de l'expérience et de la pratique françaises. Ces bétons ont été entièrement étudiés en utilisant des



DÉTERMINATION D'UNE VALEUR SEUIL À PARTIR DES RÉSULTATS (moyennes) OBTENUS POUR LES BÉTONS CONSIDÉRÉS, NOTÉE $P_{dur,seuil\ BDD}$

Exemple avec la porosité accessible à l'eau



11- Détermination d'une valeur seuil à partir des résultats (moyennes) obtenus pour les bétons considérés, notée $P_{dur,seuil\ BDD}$ - exemple avec la porosité accessible à l'eau.

12- Détermination de la valeur seuil caractéristique $P_{dur,k}$ à partir de la valeur seuil moyenne $P_{dur,seuil\ BDD}$.

11- Determination of a threshold value based on the results (means) obtained for the concretes considered, denoted $P_{dur,threshold\ DB}$ - example with porosity accessible to water.

12- Determination of the characteristic threshold value $P_{dur,k}$ based on the mean threshold value $P_{dur,threshold\ DB}$.

11

DÉTERMINATION DE LA VALEUR SEUIL CARACTÉRISTIQUE $P_{dur,k}$

à partir de la valeur seuil moyenne $P_{dur,seuil\ BDD}$



12

modes opératoires pour la détermination des propriétés de durabilité après un travail de révision.

Les investigations menées montrent la corrélation, ou l'absence de corrélation, tout aussi utile pour les analyses, entre chaque propriété de durabilité, ainsi qu'entre les propriétés de durabilité et les paramètres de composition des bétons.

La création d'une base de données aussi conséquente et représentative que celle réalisée dans le cadre du Projet National PerfDuB a été un outil indispensable pour permettre la définition d'une méthodologie cherchant à déterminer les seuils qui servent à l'approche performantielle. La fabrication, la caractérisation complète puis

l'analyse des résultats des 42 bétons ont contribué à déterminer des valeurs seuils robustes pour chaque indicateur de durabilité. Ces résultats combinés à ceux des travaux de modélisation du PN PerfDuB et au retour d'expérience des ouvrages anciens sont à la base de la mise en œuvre de l'approche performantielle dans la norme NF EN 206+A2/CN(2022) à travers l'application du fascicule de documentation FD P 18-480.

Cette base de données apporte une contribution majeure à la filière béton tant au niveau français qu'au niveau européen. Elle servira également de base pour l'élaboration des annexes françaises de la future révision de la norme européenne EN 206. □

ABSTRACT

DATABASE OF THE PERFDUB NATIONAL PROJECT AND ITS 42 CHARACTERISED CONCRETES: PROCESSING POTENTIAL

SANDRINE CHANUT, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - MICHAEL DIERKENS, CEREMA - JONATHAN MAI-NU, CERIB - EMMANUEL ROZIÈRE, GEM - PHILIPPE TURCRY, IUT ET UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE LASIE

Under the PerfDuB National Project, 42 concretes having varied standardised cements and additions (Portland cements, Portland-limestone, Portland-slag, blast-furnace cement, slag binder, fly ash, silica fume, with calcareous or siliceous filler, with metakaolin), aggregates and levels of compactness (w/b ratio of 0.35 to 0.60) were investigated. The investigations show the correlation, or absence of correlation, between durability properties and between durability properties and the mix design parameters. This database made it possible to define threshold values for each durability indicator associated with each exposure class. □

BASE DE DATOS DEL PROYECTO NACIONAL PERFDUB Y SUS 42 HORMIGONES CARACTERIZADOS: POSIBLES APLICACIONES

SANDRINE CHANUT, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - MICHAEL DIERKENS, CEREMA - JONATHAN MAI-NU, CERIB - EMMANUEL ROZIÈRE, GEM - PHILIPPE TURCRY, IUT ET UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE LASIE

En el marco del Proyecto Nacional PerfDuB, se han estudiado 42 hormigones variados en términos de cementos y adiciones normalizados (cementos Portland, Portland con calcáreo, Portland con escoria, cemento de alto horno, ligante de escoria, de cenizas volantes, de humo de sílice, con filler calcáreo o de sílice, o con metacaolín), de granulados y de niveles de compacidad (E/L de 0,35 a 0,60). Las investigaciones revelan la correlación o su ausencia entre las propiedades de durabilidad y entre las propiedades de durabilidad y los parámetros de composición. Esta base de datos ha permitido definir valores umbral para cada indicador de durabilidad asociados a cada clase de exposición. □



1

© CYRILLE DUPONT

MODÉLISATION DU VIEILLISSEMENT DES OUVRAGES ET CONTRACTUALISATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

AUTEURS : MYRIAM CARCASSÈS, PROFESSEUR D'UNIVERSITÉS, LABORATOIRE MATÉRIAUX ET DURABILITÉ DES CONSTRUCTIONS, INSA-UPS TOULOUSE - LIONEL LINGER, DIRECTEUR PÔLE BÉTON, DIRECTION DE L'INGÉNIEURIE ET DES MOYENS TECHNIQUES, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, DIRECTEUR DU DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL, PRÉSIDENT DE LA COMMISSION DE NORMALISATION AFNOR P18B "BÉTONS"

L'APPROCHE PERFORMANTIELLE DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS EST UNE BELLE OPPORTUNITÉ DE DÉVELOPPEMENT DE FORMULATIONS DE BÉTON INNOVANTES ET ÉCOLOGIQUES POUR LES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL ET CONSTITUE UN DES LEVIERS PERMETTANT DE VALORISER UN USAGE ACCRU DES ADDITIONS ET DES LIANTS À TENEUR RÉDUITE EN CLINKER. LE PROJET NATIONAL PERFDUB QUI A REGROUPÉ DURANT 5 ANS UN GRAND NOMBRE D'ACTEURS DU MONDE DE LA CONSTRUCTION APPORTE DES SOLUTIONS CONCRÈTES FACILITANT LA CONTRACTUALISATION DE CETTE APPROCHE À DE NOMBREUX PROJETS (TANT POUR LES BÉTONS COULÉS EN PLACE QUE PRÉFABRIQUÉS EN USINE) SANS ÊTRE LIMITÉE AUX GRANDS OUVRAGES.

INTRODUCTION

Afin de développer et sécuriser l'usage de l'approche performantielle de la durabilité des bétons, il est indispensable d'en faciliter et encadrer sa contractualisation.

Le fascicule de documentation de l'AFNOR FD P 18 480, élaboré dans le cadre de PerfDuB puis finalisé

par la commission de normalisation des bétons, apporte les précisions nécessaires pour appliquer la norme NF EN206/CN lorsqu'elle prévoit une justification performantielle de la durabilité du béton, sur les aspects suivants :

→ Le domaine d'application et ses conditions ;

1- Pont de Rion-Antirion en Grèce.

1- Rion-Antirion Bridge in Greece.

- La validation initiale d'une formule ;
- Le suivi et les contrôles de production ;
- La définition de seuils de performances dans le cas d'une approche "absolue" ou d'un cadre précis, notamment sur la définition du béton de référence, dans le cas d'une approche "comparative".

Les seuils de performances pour les classes d'exposition XC, XS et XD ont ainsi été établis en croisant différentes approches :

- Exploitation d'une base de données sur les indicateurs de durabilité mesurés et les essais de performances réalisés sur les 42 formules de béton testées durant le projet [GT1] ;
- Retour d'expériences sur ouvrages anciens [GT2a] ;
- Travaux de normalisation européenne en cours sur les "exposure resistance classes [ERC]" (groupes CEN TC250/SC2/WG1/TG10 et CEN TC104/SC1/WG1 avec son groupe miroir français AFNOR P18B/GECE) ;
- Travaux de modélisations réalisés sur la corrosion des armatures par carbonatation du béton d'enrobage ou par pénétration des ions chlorures [GT2b].

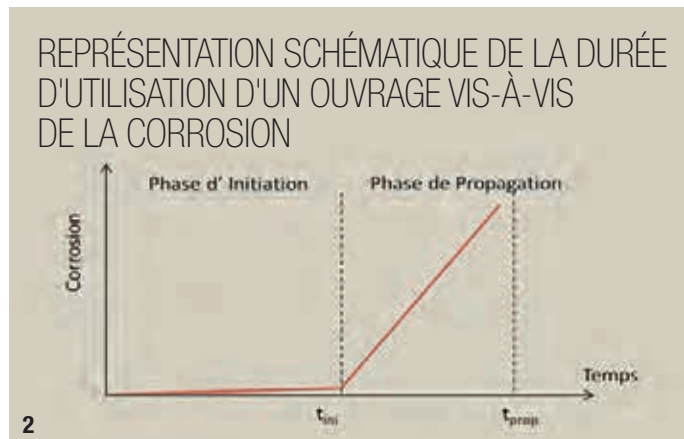
L'objectif consistait à définir des seuils sécuritaires permettant de contractualiser l'approche performantielle, sans avoir systématiquement recours à la modélisation, par application de règles compréhensibles et relativement simples, pour permettre ainsi à l'approche performantielle d'être applicable pour de nombreux projets (tant pour les bétons coulés en place que préfabriqués en usine) sans être limitée aux grands ouvrages.

L'apport de la modélisation et les progrès découlant des travaux durant ces dernières années sont développés ci-après.

LA MODÉLISATION

La partie modélisation de PerfDuB visait à mettre en place une méthodologie robuste pour justifier la durabilité des structures en béton armé ou précontraint en utilisant une approche performantielle. À partir de modèles scientifiques disponibles pour les différents phénomènes en jeu dans les environnements XC, XS et XD, l'objectif consistait à proposer un modèle d'ingénieur global capable de fournir une évaluation fiable de la durée d'utilisation des structures en béton armé soumises au risque de corrosion. Cette durée d'utilisation (t_{final}) est définie en calculant la somme de la période d'initiation (t_{ini}) et de la durée acceptable de la période de propagation de la corrosion (t_{prop}) : $t_{\text{final}} = t_{\text{ini}} + t_{\text{prop}}$ (figure 2).

Il est indispensable de prendre en compte l'étape de propagation de la corrosion tant lors de la conception



2- Représentation schématique de la durée d'utilisation d'un ouvrage vis-à-vis de la corrosion.

3- Synoptique de la démarche de modélisation.

2- Schematic representation of the service life of a structure with respect to corrosion.

3- Block diagram of the modelling approach.

de l'ouvrage que lors de la réévaluation d'une structure existante sinon on obtient des durées de vie en contradiction avec les retours d'expérience. Par exemple si on se base uniquement sur la phase d'initiation on obtient une durée de vie en XC1 plus faible qu'en

XC4 alors qu'on sait pertinemment que la corrosion ne pourra se développer que très lentement en classe XC1 par manque d'humidité dans la porosité. La prise en compte de la phase de propagation doit permettre d'optimiser l'épaisseur d'enrobage, la conception à partir du seul temps d'initiation étant excessivement sécuritaire en particulier pour la carbonatation. Cette approche est d'ailleurs celle retenue explicitement pour la future révision de l'Eurocode 2 (EC2) et pour le code modèle MC2020 de la *fib*.

Le critère de limite de service choisi est la quantité de produits de corrosion supposée nécessaire pour l'apparition des premières fissures induites par la corrosion : il s'agit d'une approche sécuritaire et liée à la pratique opérationnelle. Le travail résumé ci-après est le bilan de cette approche de modélisation. L'ensemble des données d'entrée du modèle sont des valeurs caractéristiques. La démarche générale est présentée dans la figure 3.

MODÉLISATION DANS LE CAS DES ENVIRONNEMENTS XC

Comme dans la plupart des modèles de carbonatation nous faisons l'hypothèse que l'évolution de la profondeur de carbonatation (X_c) en fonction du temps est contrôlée par la diffusion du CO_2 . X_c (mm) s'écrit donc en fonction de la racine carrée du temps. La vitesse de carbonatation naturelle, V_{NAT} , dépend à la fois des propriétés du matériau et des conditions environnementales de référence (20°C, 65% HR et $[\text{CO}_2]$ de 450 ppm). La carbonatation atmosphérique étant un phénomène lent, V_{NAT} peut être déduite des résultats d'un essai accéléré selon la version révisée de la norme XP-P18-458. Au cours de PerfDuB, 42 formulations de béton ont été testées dans des conditions naturelles et accélérées, afin de déterminer une corrélation entre V_{NAT} ($\text{mm}/\text{an}^{1/2}$) et V_{ACC} ($\text{mm}/\text{j}^{1/2}$), la vitesse de carbonatation accélérée. La relation obtenue est la suivante : $V_{\text{NAT}} = 3 V_{\text{ACC}}$.

Pour tenir compte de chacun des paramètres influents, le modèle est réécrit en décomposant chaque effet par des fonctions empiriques indépendantes qui ont été construites à partir de la base de données de PerfDuB, ainsi que des données de la littérature.

→ t_{ini} (an) est alors déterminé de telle sorte que le front de carbonatation atteigne les armatures à l'expiration de la durée d'utilisation de projet diminuée du temps de propagation. Pour cela on utilise un enrobage caractéristique correspondant à un fractile de 10% C_{char} (mm) tel que : $C_{\text{char}} = C_{\text{min}} + 5 \text{ mm}$ où : C_{min} = épaisseur d'enrobage minimum en mm (EC2) ;

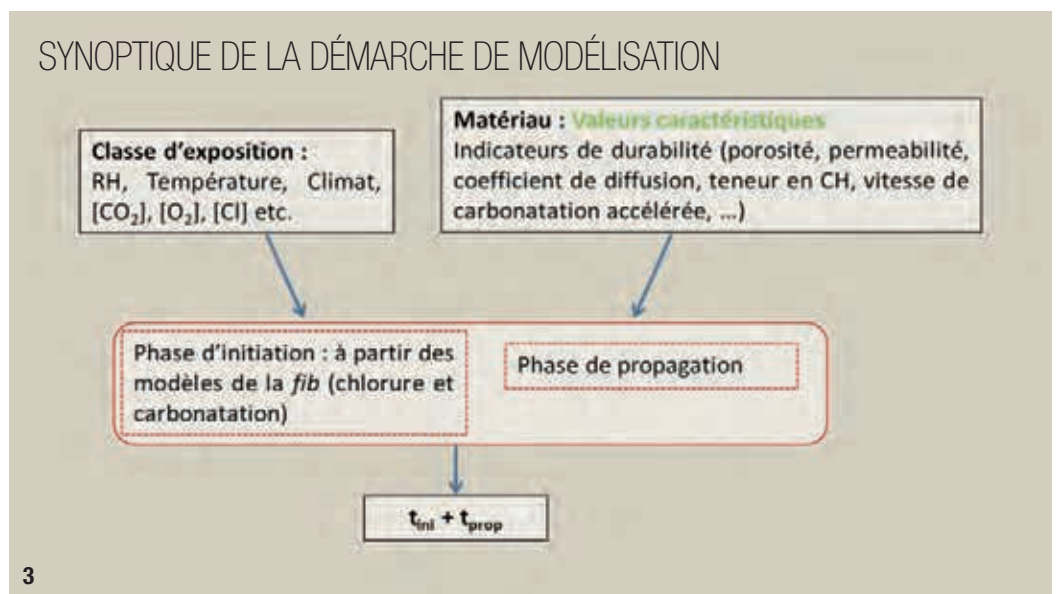


TABLEAU 1 : COMPARAISON DES RÉSULTATS DE MODÉLISATION EN XC AVEC DES OUVRAGES ANCIENS

Ouvrage	Vitesse de carbonatation		Mesure carbonatation		Paramètres météo et cure			Coefficient de temps effectifs		Carbonatation calculée	
	V _{ACC} mm/√j	V _{NAT} mm/√an	Âge (ans)	X _{c(t)} (mm)	Hr (%)	ToW	K _{RH}	kc	β _w (-)	coeff	X _{c(t)} (mm)
Bruche	1,44	4,34	66	30	65	0,05	1	1	1,5	0,88	33
Blondel	1,55	4,68	47	35	65	0,05	1	1	1,5	0,88	30
Vachette	1,19	3,56	34	17	65	0,05	1	1	1,5	0,88	19

→ t_{prop} (an) est déterminé à partir de la relation suivante : $t_{prop} = \frac{X_{crit}}{V_{corr}}$ dans laquelle X_{crit} est la perte de diamètre critique pour une ouverture de fissure de 0,1 mm et V_{corr} la vitesse de corrosion. La vitesse de corrosion est calculée à partir de la densité de courant de corrosion qui dépend de l'inverse de la résistivité électrique du béton et des conditions environnementales (température et humidité).

Les caractéristiques liées à l'environnement sont volontairement fixées de façon sécuritaire (entre autres, avec un seuil de 10 mm de précipitation quotidienne pour être comptabilisé comme un jour de pluie).

La valeur de RH correspond à la valeur d'humidité relative ambiante en France et est déterminée à partir de la classe d'exposition.

Ainsi les données d'entrée du modèle PerfDuB pour les classes XC sont :

→ Pour le matériau : la vitesse de carbonatation naturelle ou accélérée et la résistivité électrique ;

→ Pour l'environnement : la température et la classe d'exposition ;

→ Pour l'ouvrage : la Durée d'Utilisation du Projet (DUP), classiquement 50 ans pour les bâtiments courants et 100 ans pour les ouvrages courants de génie civil.

Le tableau 1 compare des résultats de la modélisation avec des mesures réalisées sur ouvrages anciens.

L'utilisation du modèle permet de définir, pour des DUP de 50 et 100 ans, des seuils de performance exprimés en vitesse de carbonatation accélérée maximale pour un environnement donné. Une modulation selon 3 classes de résistivité correspondant aux plages de performances observées sur les 42 bétons PerfDuB, dont la valeur influe directement sur le temps de propagation, permet de balayer l'ensemble des familles de béton disponibles.

MODÉLISATION DANS LE CAS DES ENVIRONNEMENTS XS-XD

Le modèle proposé pour déterminer le temps d'initiation est construit à partir d'une solution analytique de la

4- Pont de l'île de Ré : vue des piles - noter la zone de marnage et celle atteinte par les embruns.

5- Prélèvement de carottes dans une pile du pont de l'île de Ré, dans le cadre d'un projet destiné à analyser les méthodes de diagnostic de la corrosion des armatures.

4- Île de Ré bridge: view of the piers - note the tidal range area and the area reached by seawater spray.

5- Core sampling in a pier of the Ile de Ré bridge, as part of a project designed to analyse reinforcement corrosion diagnosis methods.

deuxième loi de Fick exprimant le profil de concentration en chlorures (g/L) à un instant donné t. Ce modèle est compatible avec une approche performantielle de la durabilité basée sur des essais en laboratoire qui fournissent le paramètre de transfert. Par ailleurs la condition aux limites (la concentration maximale en chlorures que l'on observe généralement en classes XS3-XD3 et qui s'explique par une accumulation de chlorures due à la succion capillaire dans la zone soumise aux cycles d'humidification/séchage) est obtenue à partir d'une relation empirique faisant intervenir la porosité à l'eau du béton. On peut ainsi calculer le temps d'initiation de la corrosion qui correspond au moment où la concentration $C(x,t)$ aux armatures est égale à la concentration critique en chlorures exprimée en chlorures libres, prise égale à 0,6 % par masse de liant, ce qui constitue une approche conservatrice et compatible avec la définition des futures classes "ERC". Le choix a été fait de travailler en chlorures libres qui sont ceux impliqués dans le processus de corrosion.



Le modèle est basé sur le coefficient de diffusion apparent des chlorures déterminé par un essai de migration, ou "coefficient de migration", réalisé normalement à l'âge de 90 jours (DCRM).

Sachant que ce coefficient diminue au fil du temps, un facteur de vieillissement α est défini. Sa valeur est déduite de la composition du liant pour la formule de béton considérée :

$$\alpha = 0,3 + \min(0,2 S; 0,15) + \min(1,1 V; 0,30) + \min(1,1 D; 0,10) + \min(1,1 MK; 0,10).$$

avec : S : fraction massique de laitier moulu ;

V : fraction massique de cendres volantes ;

D : fraction massique de fumée de silice ;

MK : fraction massique de méta-kaolin de type A.

t_{prop} est fixé par la production d'une quantité de produits de corrosion (localisée) liée à la présence de chlorures supposée conduire à l'apparition de la première fissure (induite par la corrosion hors effets du retrait ou des chargements).

On utilise un modèle d'évaluation de la densité de courant de corrosion qui dépend de l'inverse de la résistivité électrique du béton.

Le lien entre la perte de section locale et l'apparition de fissures de corrosion a été déduit de la littérature et mis à jour pour tenir compte du fait que, dans les zones immergées, les produits de corrosion sont plus mobiles et rempliront probablement la porosité du béton environnant avant d'induire des pressions de gonflement causant la fissuration du béton.

La densité de courant de corrosion n'est prise en compte que partiellement pour obtenir une réduction locale de la section d'acier, l'autre partie de la densité de courant est utilisée pour l'extension des zones anodiques (où se produit la corrosion de l'acier) dans leur longueur.

Ainsi les données d'entrée du modèle pour les classes XS-XD sont :

→ Pour le matériau : la porosité à l'eau, le coefficient de migration des chlorures, le facteur de vieillissement calculé à partir de la composition du liant, et la résistivité électrique du béton ;

→ Pour l'environnement : la température et la classe d'exposition ;

→ Pour l'ouvrage : la DUP.

Le tableau 2 compare des résultats de la modélisation avec des mesures réalisées sur ouvrages anciens.

TABLEAU 2 : COMPARAISON DES RÉSULTATS DE MODÉLISATION EN XS AVEC DES OUVRAGES ANCIENS (figures 4 et 1)

Pont	Île de Ré	Rion-Antirion (Grèce)
Type de ciment	CEM II/A-S (10% laitier)	CEM III/A (62% laitier)
D_{RCM} (m ² /s)	15.10 ⁻¹²	1.10 ⁻¹²
Facteur de vieillissement α	0,37	0,52
Δx (mm)	11	4
Résistivité ($\Omega.m$)	72	350
Calcul t_{ini} (ans)	2	128
Calcul t_{prop} (ans)	8	71
$t_{ini} + t_{prop}$ calculé (ans)	10	199
$t_{ini} + t_{prop}$ effectif (ans)	< 35	À suivre...

La sévérité des classes d'exposition a fait l'objet d'investigations renouvelées car le travail de calibration a mis en évidence, avec les mesures effectuées sur ouvrages existants, des variations notables de la concentration des chlorures en surface au sein d'une même classe d'exposition. Il est alors apparu souhaitable de distinguer des sous-classes dans le souci d'assurer une fiabilité effective de la durabilité visée, au meilleur coût économique et environnemental.

Dans la situation actuelle, la classe XD3 couvre en effet des situations de salage fréquent et de salage très fréquent, avec des dispositions d'enrobage et de spécifications du béton identiques. La prise en compte d'hypothèses sécuritaires associées au salage très fréquent ne permettrait pas de justifier certaines solutions actuellement admises et disposant d'un retour d'expérience exempt de problèmes, dans le cas notamment où la spécification XD3 est associée à XF2 et où le ciment ne comporte que rarement des additions de nature pouzzolanique.

Pour la classe XS3, la sévérité accrue de la zone de marnage et de projections, où l'apport régulier d'eau salée en surface conduit à une concentration maximale en chlorures près de deux fois supérieure à celle des zones soumises uniquement aux embruns, se traduit, dans la mesure où les enrobages spécifiés et les valeurs limites de composition du béton ne changent pas, par des dégradations d'autant plus précoces que les indications sur le choix du liant dans cet environnement sont assez incomplètes dans la norme actuelle.

Suivant la fréquence de salage, il a donc été décidé de distinguer, une classe XD3f (salage fréquent) et une classe XD3tf (salage très fréquent), sachant que le salage est considéré comme "peu fréquent" lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, "très fréquent" lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et "fréquent" entre ces deux cas. Vis-à-vis de la détermination de l'enrobage minimum $c_{min,dur}$, de la limitation des ouvertures de fissure calculées, ou de la résistance minimale, les classes XD3f et XD3tf sont couvertes par la notation unique XD3 dans les différentes clauses de l'Eurocode correspondantes.

Il a également été décidé de classer de façon différenciée, en XS3m les éléments de structures en zone de marnage ou de projections, et en XS3e ceux exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois plus, jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière. La classe XS3m intègre les parties immergées qui sont proches de zones aérées (typiquement jusqu'à 5 m au-dessous des plus basses eaux) et les zones de projections (typiquement jusqu'à 10 m au-dessus des plus hautes eaux). Vis-à-vis de la détermination de l'enrobage minimum $c_{min,dur}$, de la limitation des ouvertures de fissure calculées, ou de la résistance minimale, les classes XS3m et XS3e sont couvertes par la notation unique XS3 dans les différentes clauses de l'Eurocode correspondantes.

L'utilisation du modèle permet de définir pour des DUP de 50 et 100 ans des seuils de performance exprimés en coefficient de migration maximal pour un environnement donné.

Une modulation selon 4 classes de facteur de vieillissement permet de balayer l'ensemble des familles de béton disponibles.

La résistivité prise en compte a été fixée à 50 $\Omega.m$, ce qui est sécuritaire. Les seuils sont calculés pour deux valeurs de porosité : 15% et 13,5%.

LES SEUILS DE PERFORMANCE

La calibration de seuils de performances pour les classes d'exposition XC, XS et XD s'est effectuée en combinant la modélisation détaillée ci-avant, avec la modélisation simplifiée développée au niveau européen en appui du concept futur d'ERC (classes de résistance aux expositions), le retour d'expérience documenté sur ouvrages anciens, et les indicateurs de durabilité mesurés et les essais de performances réalisés sur les 42 formules de béton testées durant le projet. Une certaine simplicité a été recherchée (limitation du nombre de valeurs-seuils, progressivité).

Des seuils sécuritaires permettant de contractualiser l'approche performantielle ont été définis afin de pouvoir appliquer des règles compréhensibles et relativement simples, sans modification majeure des règles de détermination de l'enrobage.

Il s'est cependant avéré que la distinction de nouvelles classes d'exposition était nécessaire (voir encadré).

La classe XD3 a ainsi été subdivisée en deux classes en fonction de la fréquence de salage :

→ XD3f (salage fréquent, entre 10 et 30 jours/an) ;

→ XD3tf (salage très fréquent, au-delà de 30 jours/an).

La classe XS3 a été subdivisée en deux classes en fonction de la localisation des ouvrages et des phénomènes d'enrichissement de surface qui conduisent à des risques élevés de corrosion :

→ XS3m : zone de marnage ou de projections ;

→ XS3e : zone exposée aux embruns.

La classe XS3m intègre les parties immergées proches des zones pouvant se trouver à l'air libre (jusqu'à 5 m au-dessous des plus basses eaux) et les zones de projections (jusqu'à 10 m au-dessus des plus hautes eaux).

Les seuils de performance en classe XC portant sur la vitesse de carbonatation accélérée sont indiqués dans le tableau 3.

Ils sont cohérents avec les enrobages des classes structurales S4 (DUP de 50 ans) et S6 (DUP de 100 ans) auxquelles se réfère l'Eurocode 2.

Une alternative à l'essai de carbonatation accélérée (justifiée par le fait que la propagation de la carbonatation s'effectue principalement au sein de la pâte du béton) consiste à appliquer des seuils exprimés en porosité accessible à l'eau divisée par la fraction volumique de pâte.

Les seuils de performance en classes XS et XD sont indiqués dans les tableaux 4 et 5 : Ils sont cohérents avec les enrobages des classes structurales S4 (DUP de 50 ans) et S6 (DUP de 100 ans) auxquelles se réfère l'Eurocode 2.

LES AUTRES ASPECTS LIÉS À LA CONTRACTUALISATION

La mise en œuvre contractuelle de l'approche performantielle nécessite de maîtriser les risques techniques et

TABLEAU 3 : SEUILS DE PERFORMANCE XC SUR LA BASE D'ESSAIS DE CARBONATATION ACCÉLÉRÉE

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de résistivité à 90 j selon XP P18-481 ($\Omega.m$)	Vitesse caractéristique de carbonatation accélérée selon XP P 18-458 $V_{acc,k,90}$ (mm/(jour) ^{0,5})	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XC1	< 100	4	4
	100 à 175		
	> 175		
XC2	< 100	3	2,6
	100 à 175	3,5	3
	> 175		
XC3	< 100	1,8	1,8
	100 à 175	2,2	
	> 175		
XC4	< 100	1,8	1,8
	100 à 175	2,2	
	> 175	3*	

** Les valeurs avec astérisque sont liées à un enrobage supérieur à celui correspondant à la classe XC3 et à une forte résistivité du béton qui freine la propagation de la corrosion.*

économiques liés à la durée de préparation du chantier, à la variabilité des fournitures et à l'incertitude des résultats risquant de conduire à une "surqualité" coûteuse. Pour cela, le fascicule de documentation FD P18-480 définit les responsabilités et engagements des différents acteurs selon le(s) cadre(s) contractuel(s) approprié(s), et aborde les modalités de contrôle, avec les tolérances associées, et de gestion des non-conformités. Les dispositions principales sont décrites dans ce qui suit. Avant utilisation, une formulation du béton justifiée selon l'approche performantielle doit être approuvée (préqualifiée) au moyen d'un dossier technique détaillant la composition du béton, les performances obtenues et les limites d'application. Au cours des phases d'essai de laboratoire et d'essais initiaux, les essais liés à la durabilité doivent être effectués par un laboratoire bénéficiant de références probantes. Le choix de la méthode performantielle, alternativement aux règles prescriptives de composition, doit être accepté par toutes les parties concernées et intégré dans les spécifications techniques du

TABLEAU 4 : SEUILS DE PERFORMANCE XS SUR LA BASE D'UN ESSAI DE MIGRATION DES CHLORURES

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorure selon XP P18-462 $D_{rcm,k,90}$ ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XS1	0,30 à 0,39	16 (28*)	9 (16*)
	0,40 à 0,49	28	22
	0,50 à 0,59		
	0,60 et plus		
XS2	0,30 à 0,39	5 (9*)	3 (5*)
	0,40 à 0,49	9	5
	0,50 à 0,59	16	9
	0,60 et plus		
XS3e	0,30 à 0,39	5	5
	0,40 à 0,49	9	9
	0,50 à 0,59	16	16
	0,60 et plus	22	22
XS3m	0,30 à 0,39	2	2
	0,40 à 0,49	3	3
	0,50 à 0,59	5	5
	0,60 et plus	9	9

** Les valeurs avec astérisque sont applicables pour des bétons dont la porosité à l'eau mesurée à 90 jours (valeur caractéristique associée à un fractile de 90%) est inférieure ou égale à 13,5%.*

TABLEAU 5 : SEUILS DE PERFORMANCE XD SUR LA BASE D'UN ESSAI DE MIGRATION DES CHLORURES

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorure selon XP P18-462 $D_{rcm,k,90}$ ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XD1	0,30 à 0,39	16 (28*)	16 (22*)
	0,40 à 0,49	28	28
	0,50 à 0,59		
	0,60 et plus		
XD2	0,30 à 0,39	9	9
	0,40 à 0,49	16	16
	0,50 à 0,59	22	22
	0,60 et plus		
XD3f (salage fréquent)	0,30 à 0,39	9	9
	0,40 à 0,49	16	16
	0,50 à 0,59	22	22
	0,60 et plus		
XD3tf (salage très fréquent)	0,30 à 0,39	5	5
	0,40 à 0,49	9	9
	0,50 à 0,59	16	16
	0,60 et plus		

** Les valeurs avec astérisque sont applicables pour des bétons dont la porosité à l'eau mesurée à 90 jours (valeur caractéristique associée à un fractile de 90%) est inférieure ou égale à 13,5%.*

TABLEAU 6 : NIVEAUX RECOMMANDÉS D'APPLICATION DE LA MÉTHODE PERFORMANTIELLE

Catégorie d'ouvrage	Classe d'exposition de la partie d'ouvrage		
	XC1	XA	Autres classes
1	N1	N2	N1
2	N1	N2	N2
3	N2	N3	N3

TABLEAU 7 : MODALITÉS D'APPLICATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE EN PHASES D'ÉTUDE ET CONVENANCE

	Niveau	N1	N2	N3	
Étude	Essais de durabilité en épreuve d'étude	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	
		Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : Ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : Ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : Ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	
	Interprétation des résultats d'étude	Conformité aux seuils avec marge de sécurité imposée	Sur nominale : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils (avec marge de sécurité imposée pour l'approche absolue et les classes XC, XS et XD)	Sur nominale : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils (avec marge de sécurité imposée pour l'approche absolue et les classes XC, XS et XD)	Sur nominale : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils (avec marge de sécurité imposée pour l'approche absolue et les classes XC, XS et XD)
			Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils et cohérence avec les variations de composition testées	Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils et cohérence avec les variations de composition testées	Sur dérivées (pour les classes XC, XS et XD) : Conformité des grandeurs associées à la durabilité aux seuils et cohérence avec les variations de composition testées
Convenance	Essais de durabilité en épreuve de convenance	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité)	Sur nominale : Indicateurs généraux à 28 jours (porosité ou absorption d'eau, résistivité) + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	
	Interprétation des résultats de convenance	Conformité aux limites associées aux résultats d'étude	Conformité aux limites associées aux résultats d'étude	Conformité aux limites associées aux résultats d'étude et, pour les grandeurs associées à la durabilité (90j), conformité aux seuils	

projet. Quelles qu'en soient les motivations, la mise en œuvre de l'approche doit se faire de manière transparente pour toutes les parties prenantes et les justifications techniques doivent être fournies sur demande par l'entrepreneur et/ou l'usine de préfabrication et/ou le fournisseur de béton prêt à l'emploi, moyennant les dispositions contractuelles éventuellement nécessaires de gestion de la confidentialité. Les résistances aux classes d'exposition justifiées par l'approche perfor-

mantielle se traduisent par l'adjonction de "p" dans la désignation du béton. Par exemple : BPPS C25/30 XF1/XS2p indique le respect des exigences prescriptives de la norme pour XF1 et la justification performantielle pour XS2. Le "niveau" d'application de l'approche performantielle est fonction de la catégorie de l'ouvrage concerné. Les règles associées définissent notamment les essais initiaux et de convenance ainsi que la nature et la fréquence des essais associés au contrôle de production.

Les catégories d'ouvrage sont les suivantes :

- Catégorie 1 : éléments à l'intérieur des bâtiments, non structurels ou ne contribuant pas à la stabilité structurelle des ouvrages, les éléments et ouvrages provisoires ou facilement remplaçables, les éléments situés en environnement peu agressif ;
- Catégorie 2 : bâtiments et certains ouvrages courants de génie civil conçus pour une durée de vie de 50 ans ;

→ Catégorie 3 : ouvrages conçus pour une durée de vie de 100 ans et ouvrages exceptionnels (centrales nucléaires, barrages, tunnels, bâtiments de prestige, ...).

Le choix du niveau d'application de la méthode performantielle revient au maître d'ouvrage, sur la base des recommandations du tableau 6.

Les modalités d'application des différents niveaux, en phases d'étude et convenance (préqualification) sont synthétisées dans le tableau 7.

Pour la formule nominale, pour les essais de performance de durabilité, en XC, XD et XS, une marge de sécurité doit être prise, égale à 1,5 fois l'écart type prévisionnel déclaré par le producteur de béton. Cet écart-type ne peut être inférieur aux valeurs déduites des coefficients de variation définis au tableau 8.

Des exemples illustrant la méthodologie sont donnés dans le FD P 18 480. ▶

TABLEAU 8 : VALEURS MINIMALES DE COEFFICIENTS DE VARIATION DES INDICATEURS DE DURABILITÉ À 90 JOURS

Essai	Porosité à l'eau selon NF P 18-459 (%)	Migration des ions chlorures selon XP P18-462 (10 ⁻¹² m ² /s)	Vitesse de carbonatation accélérée selon XP P 18-458 (mm/(jour) ^{0,5})
Coefficient de variation (COV) minimal admissible	3%	20%	20%

TABLEAU 9 : MODALITÉS D'APPLICATION DE DU CONTRÔLE DE PRODUCTION

	Niveau	N1	N2	N3
Contrôle	Essais de durabilité en épreuve de contrôle (7.4)	Non Applicable	Indicateurs généraux à 28 jours + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)	Indicateurs généraux à 28 jours + ensemble des grandeurs associées à la durabilité (90j)
	Fréquence des résultats de contrôle	Non Applicable	Indicateurs généraux : tous les 500 m ³ ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1 000 m ³ ou tous les 2 mois Grandeurs associées à la durabilité : Tous les 2 ans pour l'ensemble des classes d'exposition	Indicateurs généraux : tous les 500 m ³ ou tous les mois (période initiale : 3 mois) puis tous les 1 000 m ³ ou tous les 2 mois Grandeurs associées à la durabilité : - Tous les trimestres pour les classes XC, XF, XS et XD - Tous les ans pour les classes XA

Pour couvrir la variabilité en phase de production, les résultats obtenus sur gâchées dérivées pour les indicateurs associés à la durabilité doivent rester conformes aux valeurs limites admissibles et cohérents avec les variations de composition testées (par exemple, les valeurs obtenues sur formule "dérivée liquide" doivent présenter des performances inférieures pour un dosage en eau plus élevé).

Les niveaux d'application de la méthode performantielle diffèrent significativement pour ce qui concerne le contrôle de production, organisé conformément aux indications du tableau 9.

Lors du contrôle de production, les critères d'acceptation pour les indicateurs généraux de durabilité sont définis dans le tableau 10.

CONCLUSION

La contractualisation de l'approche performantielle est encadrée par le fascicule de documentation P18 480 appelé par la NF EN 206/CN. Cette approche préfigure les futures évolutions de la normalisation européenne avec l'introduction des ERC. Elle est cependant

compatible avec l'Eurocode 2 dans sa version applicable en 2022.

Les travaux initiés par le projet PerfDuB ont notamment permis de mettre au point des modèles sous-tendant la justification performantielle de la durabilité, utilisables par des ingénieurs-experts à condition de pouvoir rassembler les données d'entrée pertinentes. Ces modèles, associés au retour d'expérience sur ouvrage et à une caracté-

risation large de l'offre béton actuelle vis-à-vis des performances de durabilité, ont permis de valider des seuils de performances pour les classes concernant la corrosion des armatures (carbonatation et chlorures) en intégrant une phase de propagation de manière sécuritaire. L'approche performantielle, outre qu'elle permet d'atteindre de façon plus fiable et ajustée techniquement les attentes de durabilité des maîtres d'ouvrage,

constitue un des leviers permettant de valoriser un usage accru des additions et des liants à teneur réduite en clinker, et de promouvoir des approches plus vertueuses vis-à-vis de l'empreinte carbone selon le contexte.

Sa mise en œuvre effective doit à coup sûr pousser les acteurs de l'acte de construire à travailler en étroite synergie afin de relever ensemble les enjeux majeurs de la construction durable. □

TABLEAU 10 : CRITÈRES D'ACCEPTATION EN PHASE DE CONTRÔLE DE PRODUCTION POUR LES INDICATEURS DE DURABILITÉ

Indicateurs généraux de durabilité	
Porosité accessible à l'eau P_{eau} (témoin) 28 jours	< 1,1 x P_{eau} (étude) 28 jours
Absorption d'eau A_{beau} (témoin) 28 jours*	< 1,1 x A_{beau} (étude) 28 jours
Résistivité électrique ρ (témoin) 28 jours	≥ 0,8 x ρ (étude) 28 jours
* Dans le cas de produits en béton préfabriqués en usine pour lesquels l'absorption d'eau est utilisée comme alternative.	
Indicateurs spécifiques aux classes d'exposition XC, XS et XD	
$P_{eau,90j}$	< 1,1 x P_{eau} (limite autorisée) 90 jours
$D_{RCM,90j}$	< 1,3 x D_{RCM} (limite autorisée) 90 jours
$V_{acc,k,90j}$	≤ 1,3 x $V_{acc,k,90j}$ (limite autorisée)
ρ_{90j}	≥ 0,8 x ρ (limite autorisée)

ABSTRACT

MODELLING OF STRUCTURE AGEING AND CONTRACTUALISATION OF THE PERFORMANCE APPROACH

MYRIAM CARCASSÈS, INSA-UPS TOULOUSE - LIONEL LINGER, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

To develop and secure the performance approach to the durability of concretes, its contractualisation must be facilitated and regulated. The AFNOR document FD P 18 480, produced within the framework of PerfDuB and then finalised by the concrete standardisation committee, provides clarifications to apply the performance aspects of French standard NF EN206/CN. Safety performance thresholds for exposure classes XC, XS and XD have therefore been established to contractualise the performance-based approach. These thresholds are based on the three approaches outlined in PerfDuB: processing of data obtained on the 42 concrete mix designs tested, experience feedback on existing structures and steel corrosion modelling work. □

MODELIZACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO DE LAS CONSTRUCCIONES Y CONTRACTUALIZACIÓN DEL ENFOQUE BASADO EN EL RENDIMIENTO

MYRIAM CARCASSÈS, INSA-UPS TOULOUSE - LIONEL LINGER, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS - FRANÇOIS TOUTLEMONDE, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

Para desarrollar y asegurar el enfoque basado en el rendimiento de la durabilidad de los hormigones, es preciso facilitar y regular su contractualización. El fascículo de documentación del Afnor FD P 18 480, elaborado en el marco del proyecto PerfDuB y finalizado por la Comisión de Normalización de Hormigones, aporta precisiones para aplicar el capítulo dedicado al rendimiento de la norma NF EN206/CN. De este modo, se han fijado umbrales de rendimiento de seguridad para las clases de exposición XC, XS y XD, que permiten contractualizar el enfoque basado en el rendimiento. Esos umbrales son el fruto de tres procedimientos desarrollados en el PerfDuB: explotación de los datos obtenidos sobre las 42 fórmulas de hormigón probadas, feedback de antiguas obras y trabajos de modelización de la corrosión de los aceros. □



© PAUL HARRISON

ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES BÉTONS : DE L'AMÉLIORATION D'ESSAIS DE DURABILITÉ EXISTANTS À LA DÉFINITION DE NOUVEAUX PROTOCOLES

AUTEURS : FRANCK CASSAGNABERE, ENSEIGNANT-CHERCHEUR, LMDC, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER, TOULOUSE - PHILIPPE FONOLLOSA, INGÉNIEUR MATÉRIAUX, BOUYGUES CONSTRUCTION, MAGNY LES HAMEAUX - EMMANUEL ROZIÈRE, ENSEIGNANT-CHERCHEUR, GEM, UMR 6183 CNRS, ÉCOLE CENTRALE DE NANTES - PHILIPPE TURCRY, ENSEIGNANT-CHERCHEUR, LASIE, UMR 7356 CNRS, LA ROCHELLE UNIVERSITÉ

DANS LE CADRE DU PROJET NATIONAL PERFDUB, UN GROUPE DE TRAVAIL S'EST INTÉRESSÉ AUX MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DES PERFORMANCES DES BÉTONS SOUMIS À TROIS AGRESSIONS EXTÉRIEURES : LA CARBONATATION (XC), LA PÉNÉTRATION D'IONS CHLORURES (XS/XD) OU LES AGRESSIONS CHIMIQUES (XA). CE PROGRAMME INTER-LABORATOIRES ABOUTIT AUJOURD'HUI À UN CORPUS D'ESSAIS DE DÉTERMINATION D'INDICATEURS DE DURABILITÉ ET DE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ QUI PERMET LA MISE EN PLACE DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE.

CONTEXTE ET OBJECTIFS

À l'heure actuelle, la durabilité des ouvrages en béton armé est justifiée, dans la plupart des cas, dans le cadre d'une obligation de moyens, qui peut se résumer à trois éléments : la composition du béton, sa résistance caractéristique et l'épaisseur de l'enrobage. Si cette approche a le mérite d'être basée sur un retour d'expérience, elle limite fortement toute innovation, du matériau à la structure elle-même. À l'heure où les enjeux environnementaux passent au centre des préoccupations du BTP, il est nécessaire d'aller vers une autre manière d'envisager la conception des ouvrages.

L'approche performantielle, qui a fait l'objet du Projet National PerfDuB, constitue une voie prometteuse. Plutôt que d'imposer au concepteur la composition du béton, cette approche lui demande de garantir les performances pour chacune des agressions extérieures susceptibles de nuire aux fonctions de l'ouvrage sur sa durée de vie théorique. Un élément clé pour mettre en place une telle approche est

de pouvoir évaluer les performances du béton en lien avec les dégradations. Trois familles de vieillissement ont été étudiées au cours du PN :

→ La carbonatation : ce phénomène est un transfert réactif du CO_2 atmosphérique au sein de la porosité dont l'une des conséquences est une acidification du matériau. La carbonatation provoque un risque de corrosion dont la vitesse est contrôlée par la résistivité du matériau. Dans la réglementation, ce vieillissement correspond aux classes d'exposition XC ;

→ La pénétration des chlorures : dans un environnement de concentration élevée en chlorures, comme l'eau de mer ou l'eau des piscines, les aciers peuvent subir une corrosion par attaque des ions après leur transfert dans l'enrobage. Ce risque est pris en compte dans les classes d'exposition XS (chlorures marines) et XD (chlorures non marins) ;

→ Les attaques chimiques externes : certaines ambiances peuvent s'avérer destructives pour les bétons ;

citons les eaux de ruissellement de pluie, qui provoquent une lixiviation, les eaux d'un réseau d'assainissement à l'origine de biodégradations, les sols à forte teneur en sulfates. Ces agressions sont définies dans les classes d'exposition XA.

Pour déterminer les performances d'un béton, deux méthodes sont possibles. La première consiste à déterminer des indicateurs de durabilité, c'est-à-dire des propriétés, comme la porosité, qui contrôlent le phénomène à l'origine du vieillissement. La seconde méthode consiste à soumettre le béton à un essai de vieillissement accéléré. En conditions naturelles, les phénomènes de dégradation sont lents, du moins à l'échelle de l'ingénieur. Un essai de carbonatation accélérée expose les échantillons à une concentration en CO_2 cent fois plus élevée que dans l'atmosphère, ce qui permet d'observer la carbonatation dans un temps beaucoup plus court.

Une fois les performances déterminées, il y a deux méthodes pour les évaluer : → La méthode "absolue" : les indi-

cateurs ou les résultats d'un essai accéléré sont comparés à des valeurs seuils établies pour chaque classe d'exposition (voir dans ce numéro l'article "Base de données du PN PerfDuB et ses 42 bétons caractérisés : quelles exploitations possibles ?") ;

→ La méthode "comparative" : les performances sont comparées à celles d'un béton de référence, répondant par exemple aux obligations de moyens de la norme.

La condition sine qua non à la mise en place d'une approche performantielle est de disposer d'essais dont les protocoles sont validés par la communauté scientifique et technique. Ces essais doivent reposer sur le cahier des charges suivant :

→ L'essai est réalisé sur des éprouvettes en béton ;

→ Le montage doit être facile à mettre en œuvre et la durée de l'essai courte (si possible moins de trois mois) ;

→ La répétabilité et la reproductibilité doivent être bonnes ;

- Un essai accéléré doit être représentatif du phénomène naturel ;
- Le résultat de l'essai réalisé sur différents bétons doit permettre un classement discriminant des matériaux, identique à celui qui aurait été obtenu avec un vieillissement naturel.

Au cours du PN, deux groupes de travail ont été chargés de la méthodologie. Sur la base de l'existant (essais normalisés ou non), un premier groupe s'est intéressé aux essais de détermination des performances dans le cas des classes XC et XS/XD. Un second s'est intéressé aux essais relatifs aux classes XA.

CLASSES D'EXPOSITION XC ET XS/XD

La vie des ouvrages soumis à la carbonatation (XC) ou à la pénétration des ions chlorures (XS/XD) peut être décomposée en deux phases :

- Une première phase d'initiation de la corrosion d'une durée correspondant au temps de transfert des espèces agressives (CO₂, chlorures) jusqu'au premier lit d'armatures ;
- Une seconde phase de propagation de la corrosion qui voit les aciers se dégrader avec un gonflement des produits de corrosion et au final une fissuration de l'enrobage. La fin de cette phase correspond aux premiers signes de dégradation en peau de l'ouvrage.

À chacune des phases ont été associés des indicateurs de durabilité et des essais de vieillissement accéléré (tableau 1).

Le groupe de travail en charge des essais a procédé en trois étapes. D'abord, les modes opératoires existants, pour certains déjà normalisés, ont été analysés puis ont subi une campagne d'essais croisés sur un nombre restreint de bétons (cinq compositions, du béton au ciment CEM I au béton à hautes performances formulés avec de la fumée de silice, en passant par des bétons au ciment au laitier de haut fourneau). En parallèle, des études ont été réalisées, sur ces mêmes bétons, pour évaluer l'influence de certains paramètres des essais. À la suite de cette étape, dont l'objectif était surtout de consolider les méthodes existantes, les protocoles ont connu certaines améliorations ou précisions. Notons qu'un nouveau mode opératoire a été proposé pour l'essai de carbonatation accéléré sur la base des versions disponibles en 2016 de l'essai français (XP P18-458) et de l'essai européen (FprCEN/TS 12390-12:2010).

TABLEAU 1 : RÉCAPITULATIF DES INDICATEURS DE DURABILITÉ ET ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉS SELON LES CLASSES D'EXPOSITION (XC, XS/XD) ET LES PHASES DE LA VIE DE L'OUVRAGE

Exposition	Phase d'initiation de la corrosion	Phase de propagation de la corrosion
XC	Essai de carbonatation accélérée	Résistivité électrique
XS/XD	Coefficient de diffusion des ions chlorures	

© PHILIPPE TURCROY

TABLEAU 2 : SEUILS ET RÉFÉRENCES POUR LES CLASSES XA

Caractéristiques chimiques	Références	XA1	XA2	XA3
Eau souterraine				
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6 000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 et ≥ 5,5	≤ 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 3,5
CO ₂ agressif (mg/l)	EN 13577	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 jusqu'à saturation
NH ₄ ⁺ (mg/l)	ISO 7150	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100
Mg ²⁺	ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1 000	> 1 000 et ≤ 3 000	> 3 000 jusqu'à saturation
Sol				
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	EN 196-2	≥ 2 000 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000
Acidité (ml/kg)	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	Non rencontré	

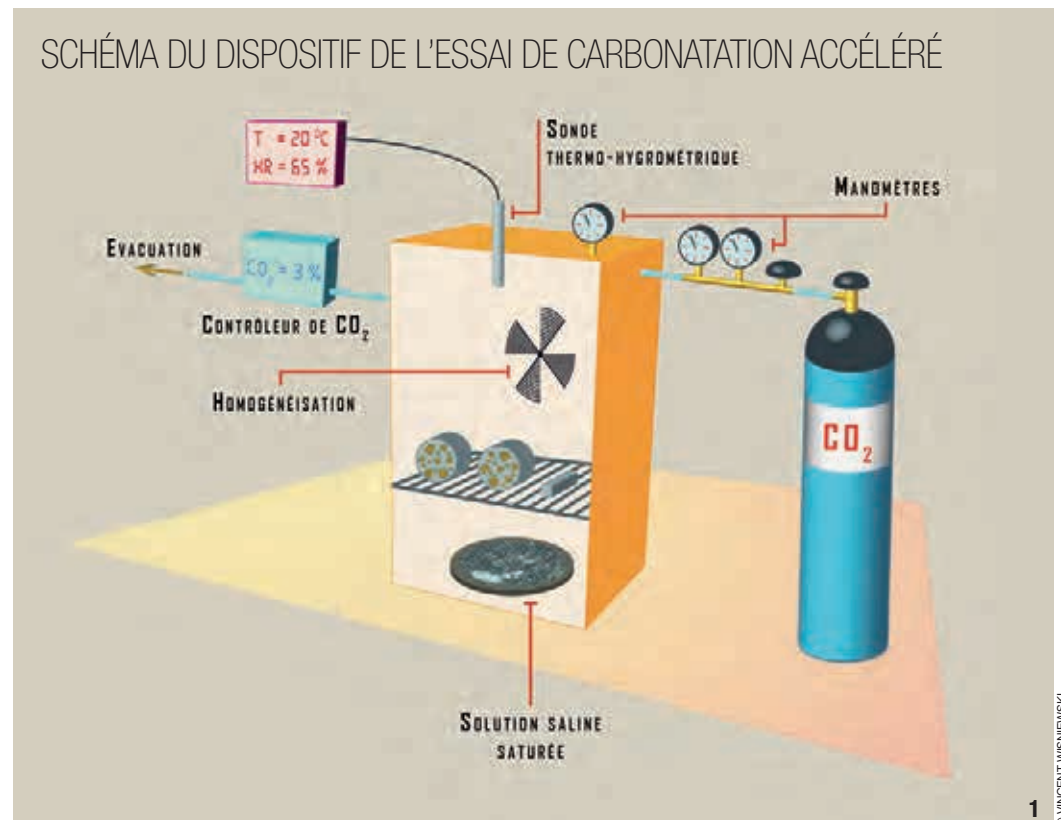
© VINCENT WISNIEWSKI

De fait, la reproductibilité des deux essais s'est avérée faible à l'issue des essais croisés et l'essai européen très peu sensible (seul un des cinq bétons testés présentait des profondeurs de carbonatation facilement mesurables en 70 jours d'essai). La figure 1 montre le dispositif de l'essai de carbonatation proposé au terme du PN et la figure 2 récapitule ses grandes opérations.

1- Schéma du dispositif de l'essai de carbonatation accéléré.

1- Diagram of the accelerated carbonation test apparatus.

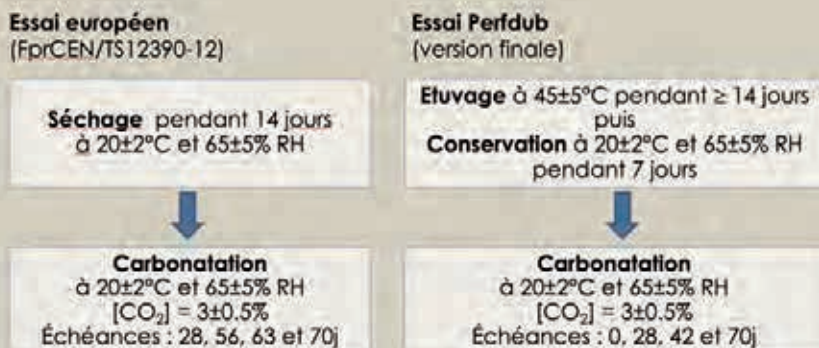
Dans cet ensemble d'essais (tableau 1), la détermination de la résistivité électrique permet de prendre en compte explicitement la phase de propagation de la corrosion. L'essai est réalisé selon un mode opératoire du Lcpc (20210), qui s'inspire de la méthode du rapport final du projet Européen Chlortest. Les modes opératoires, consolidés ou modifiés, ont servi dans un deu-



© VINCENT WISNIEWSKI

COMPARAISON DU MODE OPÉRATOIRE

de l'essai de carbonatation accéléré européen et du mode opératoire proposé à l'issue du PN PerfDuB



© PHILIPPE TURCROY

2

2- Comparaison du mode opératoire de l'essai de carbonatation accéléré européen et du mode opératoire proposé à l'issue du PN PerfDuB.

3- Attaques chimiques externes sur ouvrages : a) ruissellement d'eau dans une galerie, b) réaction sulfatique externe sur pile de pont, c) biodégradation dans réseau d'assainissement.

2- Comparison of the operating procedure for the European accelerated carbonation test and the operating procedure proposed following the PerfDuB National Project.

3- External chemical attacks on structures: a) trickling of water in a gallery, b) external sulphate attack (ESA) on bridge pier, c) biodegradation in drainage network.



© PAUL HARRISON



© ARNAUD BOUSSOU



© TEKMAID

xième temps à la caractérisation de 42 bétons. Enfin, des essais croisés rassemblant, pour certains, plus de vingt laboratoires, ont été menés sur trois bétons. Les résultats de cette campagne inter-laboratoires ont permis la détermination des données de fidélité définies par la norme NF ISO 5725 pour tous les modes opératoires.

CLASSE D'EXPOSITION XA

Certains protocoles de dégradation accélérée font déjà l'objet de normes ou de recommandations. On peut citer la méthode d'évaluation d'un béton vis-à-vis des risques d'alcali-réaction de la norme NF P 18-454, complétée par le Fascicule FD P 18-456. En revanche, d'autres méthodes de vieillissement liées aux attaques chimiques nécessitent des approfondissements. Même si les mécanismes sont bien connus, il est essentiel de développer des protocoles permettant de bien reproduire les mécanismes naturels en n'accéléralant que la cinétique de la pathologie. Selon la norme NF EN 206/CN, le tableau 2 présente les seuils pour les expositions "Attaques chimiques" (XA1, XA2 et XA3).

Dans le cadre du PN, trois dégradations ont été ciblées : la lixiviation par eau pure et acide, la biodégradation par H₂S et la réaction sulfatique externe. Les photos de la figure 3 montrent les résultats de ces attaques sur ouvrages. L'objectif du groupe de travail était triple : i) mettre en place des essais accélérés avec un cahier des charges bien défini ; ii) amener les protocoles vers la normalisation ; iii) faire émerger des seuils de performance pour la méthode absolue. Le programme regroupant des acteurs industriels et académiques s'est déroulé en quatre phases :

- 1- Perfectionnement des protocoles d'essai accélérés de RSE réalisé sur huit bétons ;
- 2- Essais de fiabilité et de répétabilité sur trois bétons ;
- 3- Essais croisés inter-laboratoires réalisés sur trois bétons ;
- 4- Analyse et contractualisation.

FOCUS SUR LA CLASSE XA - SULFATE

La dégradation par Réaction Sulfatique Externe (RSE)

La suite de l'article est consacrée au cas particulier de la méthode pour évaluer la performance vis-à-vis de la RSE, qui désigne toutes les réactions de dégradation provoquées par les ions sulfate (SO₄²⁻).

Le phénomène macroscopique observé est l'expansion de la pâte de ciment suivie de sa fissuration entraînant une aggravation du processus d'attaque (figure 4).

Dans l'environnement naturel, les sulfates peuvent être présents sous forme solide (sols gypseux, granulats), en solution (eaux chargées en sulfates) et gazeuse (oxydation des SO_x contenus dans l'atmosphère ou de H_2S produit par les eaux usées).

Procédures de vieillissement accélérées

Dans le cadre du PN, deux protocoles ont été utilisés :

- Le "protocole par saturation" développé dans les travaux de thèse de Messad en 2009 ;
- Le "protocole par immersion-séchage" de la norme suisse (SIA262, 2013-2019) développé par Loser et Leemann.

Les essais consistent à immerger des échantillons de bétons dans une solution de sulfate de sodium et de mesurer



© FRANCK CASSAGNABÈRE

dans le temps la variation de masse et de longueur des échantillons. Le tableau 3 présente les paramètres des deux procédures. La figure 5 présente les dispositifs expérimentaux.

Méthodologie de l'approche performantielle sur les classes XA - Sulfate

Il ressort des études du PN que les deux protocoles accélérés étudiés peuvent être retenus pour caractériser un béton vis-à-vis de sa résistance à la RSE.

Dans cette méthodologie pour évaluer un béton vis-à-vis d'une attaque sulfatique externe, on peut distinguer deux cas de figure :

→ **Cas général** avec les critères de composition conformes (L_{eq} et E_{eff}/L_{eq}) et un liant non conforme au fascicule FD P18-011.

→ **Cas particulier** avec les critères de composition non conformes (L_{eq} et E_{eff}/L_{eq} et granulats non conformes par rapport à l'absorption) et un liant conforme au fascicule FD P18-011. Notons que le squelette granulaire des bétons à comparer doit être équivalent en dosage et nature minéralogique.

LE CAS GÉNÉRAL

Le tableau 4 présente les critères de qualification performantielle pour les classes XA Sulfate pour une DUP de 50/100 ans dans le cas général.

Dans le cas général et pour les classes XA1 et XA2 Sulfate, l'approche performantielle basée sur les deux essais accélérés par méthode comparative à un béton de référence est retenue. Il est possible de choisir un des deux essais pour réaliser cette comparaison. Les bétons de référence doivent être :

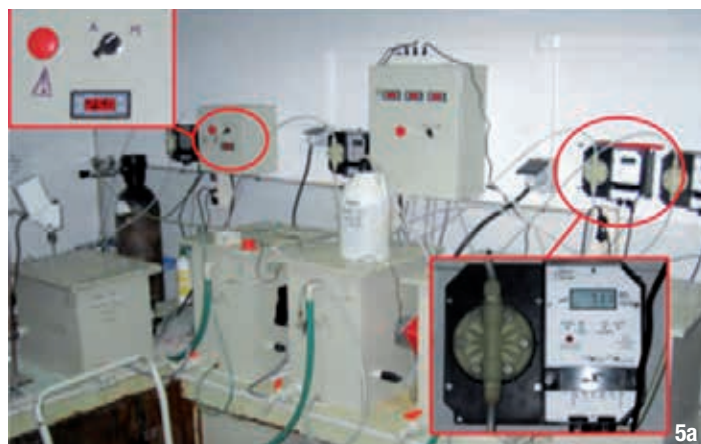
TABLEAU 3 : CONDITIONS D'ESSAI POUR LES DEUX PROTOCOLES

Protocole	Par saturation	Par immersion/séchage
Corps d'épreuve	3 prismes 7 x 7 x 28 cm ³ 6 cylindres Ø11 x 22 cm ³ pour résistance 4 cylindres Ø11 x 22 cm ³ pour porosité et migration	6 cylindres Ø2,8 x 15 cm ³ obtenus par carottage
Préconditionnement	Saturation 48 h avec solution d'attaque	4 cycles d'immersion/séchage
Condition d'exposition	Immersion continue (12 sem.)	Immersion continue (8 sem.)
Contrôle du pH	Contrôlé à 7 (±1) à l'acide sulfurique	/
Concentration de la solution d'attaque	8,9 g/L de Na ₂ SO ₄ (6 g/L de SO ₄ ²⁻)	50 g/L de Na ₂ SO ₄ (33,8 g/L de SO ₄ ²⁻)
Température	Contrôlée à 25°C	20°C
Renouvellement de la solution	Toutes les 4 semaines	aucun
Volume de solution	V _{béton} /V _{solution} = 1,0	2,4 litres
Durée du test	12 semaines en immersion	12 semaines (4 sem)
Mesures	Variation de longueur Variation de masse Variation d'indicateurs R _c , p _w , D _{app}	Variation de longueur Variation de masse

© FRANCK CASSAGNABÈRE

4- Éprouvette de béton atteinte de RSE.
5- Protocole accéléré de vieillissement par RSE :
a) par saturation,
b) par immersion/séchage.

4- Concrete test specimen damaged by ESA.
5- Accelerated protocol for ageing by ESA:
a) by saturation,
b) by submersion/drying.



© FRANCK CASSAGNABÈRE



© FRANCK CASSAGNABÈRE

TABLEAU 4 : CLASSE XA - SULFATES. CRITÈRES DE QUALIFICATION PERFORMANTIELLE POUR LES CLASSES D'ATTAQUE CHIMIQUE XA SULFATES POUR UNE DUP 50/100 ANS DANS LE CAS GÉNÉRAL

Classe d'exposition	Approche générale (valeurs limites)		Béton de référence
	Option 1	Option 2	
	Essai par saturation Essai Messad	Essai par immersion- séchage - Essai SIA	
XA1	≤ Béton de référence	≤ Béton de référence	Conforme NF EN 206/CN ou F65 + E _{eff} /L _{eq} abaissé de 0,05 Ciment : CEM I PM
XA2	≤ Béton de référence	≤ Béton de référence	Conforme NF EN 206/CN ou F65 + E _{eff} /L _{eq} abaissé de 0,05 Ciment : CEM I SR3
XA3	0,05% à 12 semaines (0,07% max sur valeurs individuelles)	0,12% à 8 semaines d'immersion totale	

TABLEAU 5 : CLASSE XA - SULFATES. CRITÈRES DE QUALIFICATION PERFORMANTIELLE POUR LES CLASSES D'ATTAQUE CHIMIQUE XA SULFATES POUR UNE DUP 50/100 ANS DANS LE CAS PARTICULIER

Classe d'exposition	Approche comparative	
	D _{rcm90j}	Béton de référence
XA1	≤ Béton de référence	Conforme NF EN 206/CN ou F65 + E _{eff} /L _{eq} abaissé de 0,05 Ciment : Ciment CEM I PM
XA2	≤ Béton de référence	Conforme NF EN 206/CN ou F65 + E _{eff} /L _{eq} abaissé de 0,05 Ciment : Ciment CEM I SR3
XA3	≤ Béton de référence	Conforme NF EN 206/CN ou F65 + E _{eff} /L _{eq} abaissé de 0,05 Ciment : Ciment CEM I SR3

- Conformes aux prescriptions de la norme NF EN 206/CN ou du Fascicule 65 ;
- Avec un rapport E_{eff}/L_{eq} abaissé de 0,05 ;
- Avec l'utilisation d'un ciment CEM I PM pour la classe XA1 et d'un ciment CEM I SR3 pour la classe XA2.

Dans le cas général et pour la classe XA3 Sulfate, l'approche performantielle basée sur les deux essais accélérés de RSE par méthode globale avec seuil de performance est retenue. Selon l'essai choisi, la variation dimensionnelle axiale

du béton à qualifier ne devra pas dépasser les valeurs seuils consignées dans le tableau 4 après la phase d'immersion dans la solution de sulfate de sodium.

LE CAS PARTICULIER

Le tableau 5 présente les critères de qualification performantielle pour les classes XA Sulfate pour une DUP 50/100 ans dans le cas particulier. Dans ce cas particulier, et quelle que soit la classe d'exposition sulfate, l'approche performantielle est basée sur l'essai de migration des ions Cl⁻ par une méthode comparative à un béton de référence.

- Les bétons de référence doivent être :
- Conformes aux prescriptions de la norme NF EN 206/CN ou du Fascicule 65 ;
 - Avec un rapport E_{eff}/L_{eq} abaissé de 0,05 ;
 - Avec l'utilisation d'un ciment CEM I PM pour la classe XA1, d'un ciment CEM I SR3 pour les classes XA2 et XA3.

CONCLUSION

Le Projet National PerfDuB a rassemblé des laboratoires publics et privés sur plus de six ans.

Les acteurs ont mené un vaste travail sur la méthodologie de la caractérisation des performances de bétons en lien avec la durabilité des ouvrages. Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux précédents, comme les travaux du groupe de l'Association Française de Génie Civil (Afgc) "Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages".

Annuellement, les résultats du PN ont été présentés à un comité d'experts européens.

Aujourd'hui, le corpus de modes opératoires d'essais issu du PN constitue une proposition forte de la France pour la mise en place de l'approche performantielle à l'échelle européenne voire mondiale.

Les indicateurs retenus pour évaluer la phase d'initiation de la corrosion sont la vitesse de carbonatation accélérée et la porosité accessible à l'eau pour la classe XC (carbonatation), et le coefficient de migration des ions chlorures pour les classes XS/XD (pénétration des chlorures). La résistivité est utilisée dans les deux cas pour évaluer les performances du béton pendant la phase de propagation de la corrosion. Dans le cas des classes XA (dégradations chimiques), différents protocoles de lixiviation à pH constant, d'expansion liée à la réaction sulfatique externe et de biodégradation sont aujourd'hui disponibles.

Le travail du PN PerfDuB doit se poursuivre en allant vers la normalisation de certains modes opératoires. D'autres campagnes d'essais inter-laboratoires seront à prévoir par la communauté pour renforcer les expériences des différents acteurs sur les nouveaux modes opératoires, comme celui de l'essai de carbonatation accélérée. □

ABSTRACT

EVALUATION OF CONCRETE PERFORMANCE: FROM THE IMPROVEMENT OF EXISTING DURABILITY TESTS TO THE DEFINITION OF NEW PROTOCOLS

FRANCK CASSAGNABERE, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER, TOULOUSE - PHILIPPE FONOLLOSA, BOUYGUES CONSTRUCTION - EMMANUEL ROZIÈRE, ÉCOLE CENTRALE DE NANTES - PHILIPPE TURCRY, LA ROCHELLE UNIVERSITÉ

The performance approach makes it possible to evaluate concretes on the basis of their durability properties. *The potential durability of the coating is estimated on the basis of indicators and laboratory tests. The work of the PerfDuB National Project made it possible to propose test methods representing the main exposure classes and the associated indicators: kinetics of accelerated carbonation, porosity accessible to water, coefficient of diffusion of chloride ions and resistivity for classes XC and XD/XS, leaching at constant pH, expansion due to external sulphate attack and biodegradation indicator for the XA classes.* □

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS HORMIGONES: DE LA MEJORA DE LAS PRUEBAS DE DURABILIDAD EXISTENTES A LA DEFINICIÓN DE NUEVOS PROTOCOLOS

FRANCK CASSAGNABERE, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER, TOULOUSE - PHILIPPE FONOLLOSA, BOUYGUES CONSTRUCTION - EMMANUEL ROZIÈRE, ÉCOLE CENTRALE DE NANTES - PHILIPPE TURCRY, LA ROCHELLE UNIVERSITÉ

El enfoque basado en el rendimiento permite valorizar hormigones sobre la base de sus propiedades de durabilidad. *La durabilidad potencial del revestimiento se estima a partir de indicadores y pruebas de laboratorio. Los trabajos del Proyecto Nacional PerfDuB han permitido proponer métodos de prueba representativos de las principales clases de exposición e indicadores asociados: cinética de carbonatación acelerada, porosidad accesible al agua, coeficiente de difusión de los iones de cloruro y resistividad para las clases XC y XD/XS, lixivación a pH constante, expansión ligada a la reacción sulfática externa e indicador de biodegradación para las clases XA.* □



© P. BARTHÉLÉMY, J. MAI-NHU ET V. BOUTEILLER

LA CORROSION DES BÉTONS ARMÉS DU PN PERFDUB AU LABORATOIRE ET SUR SITES

AUTEURS : VÉRONIQUE BOUTEILLER, DIRECTRICE DE RECHERCHE, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL, MAST-EMGCU - SANDRINE CHANUT, RESPONSABLE MATÉRIAUX BÉTONS, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - JONATHAN MAI-NHU, RESPONSABLE DU DÉPARTEMENT DURABILITÉ DES OUVRAGES, CERIB - ÉLISABETH MARIE-VICTOIRE, RESPONSABLE DU PÔLE BÉTON, LRMH - PHILIPPE TURCRY, ENSEIGNANT-CHERCHEUR, LASIE, LA ROCHELLE UNIVERSITÉ, UMR 7356 CNRS

L'ÉTUDE DE LA CORROSION DES ARMATURES DANS 11 BÉTONS DU PN PERFDUB A ÉTÉ INITIÉE EN 2019, EN COMPLÉMENT DE L'ÉTUDE DE LA DURABILITÉ DU BÉTON. DES CORPS D'ÉPREUVE EN BÉTON ARMÉ, 600 PRISMES ET 28 MURS DONT 6 INSTRUMENTÉS ONT ÉTÉ ENTREPOSÉS DANS DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES CONTRÔLÉES OU NATURELLES. CE TRAVAIL PERMETTRA DE CONSTITUER UNE BASE DE DONNÉES SUR LE SUIVI DE LA CORROSION EN FONCTION DE LA FORMULATION DE BÉTON, DE LA CONTAMINATION (IONS CHLORURE, CARBONATATION), DE LA CLASSE D'EXPOSITION ET DU TEMPS.

CONTEXTE ET OBJECTIFS

La corrosion est reconnue comme la principale cause de détérioration des structures en béton armé dans les ouvrages d'art, les bâtiments d'habitation, les structures d'énergie, les monuments historiques, et devient une préoccupation cruciale étant donné le vieillissement des structures.

La durabilité des structures en béton armé dépend, d'une part, de l'efficacité de la barrière "béton d'enrobage" à retarder la pénétration des agents agressifs (ions chlorure et/ou carbonatation) et, d'autre part, de la résistance à la corrosion de l'armature en acier carbone dans le béton qui évolue. Ces aptitudes dépendent de la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage. À ce jour, l'approche performantielle constitue une méthodologie robuste pour justifier la durabilité de solutions

TABLEAU 1 : LES FORMULATIONS (ISSUES DU PN PERFDUB) DES CORPS D'ÉPREUVES EN BÉTON ARMÉ POUR LES DEUX ÉTUDES DE SUIVI DE LA CORROSION DES ARMATURES

Béton	Nature du liant et quantité (kg/m ³)	Teneur en clinker (kg/m ³)	E _{eff} /L	Nature des granulats*	Absorption d'eau moyenne des granulats (%)
B01	CEM I (289)	272	0,60	2	2,7
B02	CEM I (231) + cendres volantes (98)	217	0,54	2	2,7
B04	CEM III/A (287)	101	0,61	2	2,7
B05	CEM I (122) + laitier de haut fourneau (184)	115	0,57	2	2,7
B07	CEM I (267) + additions calcaire (188)	262	0,41	2	2,7
B31	CEM III/A (383)	137	0,40	1	1,0
B36	CEM V (363)	207	0,46	4	4,0
B37	CEM V (374)	207	0,45	3	0,6
B38	CEM I (354) + fumées de silice (30)	346	0,35	1	1,0
B40	CEM I (261) + additions siliceuses (112)	245	0,47	2	2,7
B41	CEM I (302) + métakaolin (76)	293	0,35	1	1,0

* Nature des granulats : Type 1 : alluvionnaire semi-concassé / Type 2 : alluvionnaire silico-calcaire, sable roulé et gravillons concassés / Type 3 et 4 : granulats calcaire concassés.

© J. MAI-NHU

béton, mais n'intègre pas, en dehors de la résistivité électrique, de grandeurs en lien avec la corrosion des armatures. Ce travail vise à apporter une complémentarité entre approche performantielle de la durabilité du béton d'enrobage (transports réactifs) et approche de la corrosion des armatures dans le béton (réactions électrochimiques). Pour cette dernière, l'étude apportera une meilleure connaissance de la corrosion des armatures dans des bétons dont les formulations ont été choisies dans le cadre du Projet National PerfDuB, les données actuelles de la littérature ayant été essentiellement obtenues sur des ciments Portland sans ajout. De plus, elle vise à caractériser la corrosion des armatures sur des corps d'épreuve entreposés dans des conditions contrôlées de température et d'humidité relative ou en conditions de vieillissement naturel, les données actuelles de la littérature

1- Corps d'épreuves "prismes" :
a) descriptif (côtes en mm),
b) enceintes climatiques,
c) sites de vieillissement naturel de La Rochelle (zone de marnage) et
d) du Cerib à Épernon.

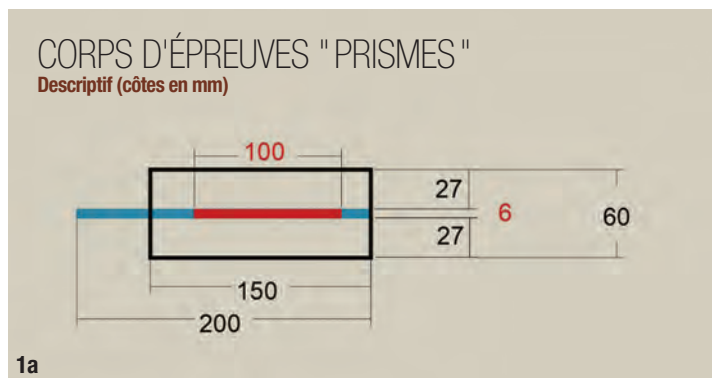
1- "Prism test specimens":
a) description (dimensions in mm),
b) climatic test chambers,
c) natural ageing sites at La Rochelle (tidal range area) and
d) Cerib site at Épernon.

ayant été essentiellement obtenues au laboratoire à l'aide d'essais accélérés. Pour cela, les caractérisations électrochimiques sont réalisées à l'aide de contrôles non destructifs (CND) ponctuels en utilisant des potentiostats de laboratoire et des matériels de terrain. Enfin, certains corps d'épreuve sont instrumentés à l'aide de capteurs noyés. Cette approche de suivi de corrosion en continu a pour le moment été peu utilisée et mérite d'être confortée. Elle apportera des éléments complémentaires aux résultats de CND. La complémentarité des résultats permettra tout d'abord de fiabiliser le diagnostic de corrosion des structures en béton armé. Les résultats permettront également la création et l'alimentation d'une base de données de suivi de corrosion obtenue à partir des résultats de durabilité, des CND et du monitoring, dans le but de qualifier les différentes phases d'initiation et de propagation de la corrosion

en fonction des environnements et du temps, mais aussi l'impact des conditions climatiques. Les résultats pourront être utiles à conforter certains modèles de prédiction.

Cette étude démarrée en 2019 devra être poursuivie sur plusieurs décennies pour évaluer la corrosion en fonction du temps. Sur le long terme, les objectifs sont les suivants :

- Comprendre la durabilité du béton armé selon la double approche durabilité du béton d'enrobage et corrosion des armatures ;
- Analyser les résultats de corrosion de bétons armés obtenus au laboratoire sur des éprouvettes de dimensions centimétriques, entreposées dans des conditions de température et d'humidité relatives contrôlées ou non, et les résultats obtenus sur des corps d'épreuve structurels entreposés sur différents sites de vieillissement naturel ;



→ Proposer un système de "Corrosion Health Monitoring" sur les corps d'épreuve structurels pour une meilleure prédiction de la corrosion des armatures dans les bétons en fonction des environnements urbain et marin.

ORGANISATION DES ÉTUDES

Les études portent sur des corps d'épreuve en béton armé de dimensions différentes : des prismes de dimensions centimétriques pour l'étude au laboratoire et des murs de dimensions métriques (éléments structurels) pour l'étude sur sites de vieillissement naturel. Le programme de recherche se décline ainsi selon les deux études suivantes :

→ **L'étude 1** (PN PerfDuB Corrosion) porte sur la corrosion des armatures dans des "prismes" en béton selon trois formulations, B01, B04 et B31, issues du Projet PN PerfDuB (tableau 1). Elle s'inscrit dans la continuité de la recherche des projets ANR APPLLET et MODEVIE. Les armatures sont en acier carbone, rond lisse ou haute adhérence. Les prismes obtenus après découpe de dalles sont entreposés dans des conditions contrôlées de température et d'humidité relative, et dans des conditions naturelles. Pour étudier la corrosion induite par les ions chlorure, certaines dalles ont été coulées avec une addition d'ions chlorure dans l'eau de gâchage (test accéléré) tandis que certains prismes sont entreposés dans des conditions maritimes avec marnage. Pour étudier la corrosion induite par la carbonatation, certains prismes sont carbonatés de manière accélérée. Les condi-



© P. BARTHÉLÉMY, J. MAI-NHU ET V. BOUTELLER

tions de température et d'humidité relatives sont principalement des couples contrôlés (20°C et 60, 80 et 92 % d'humidité relative et 45°C et 60, 80 et 92 % d'humidité relative) et des conditions naturelles extérieures (zone de marnage à La Rochelle, site de vieillissement naturel de l'Université Gustave Eiffel à Marne La Vallée et site de vieillissement naturel du Cerib à Épernon).

→ **L'étude 2** (PN PerfDuB CE) vise à caractériser la durabilité du béton d'enrobage et des armatures de corps d'épreuve de type "murs"

2- Corps d'épreuves "murs" :
a) description, b) sites de vieillissement naturel du Cerib à Épernon et c) de La Rochelle au pied de la Tour Saint-Nicolas (marnage).

2- "Wall" test specimens:
a) description, b) natural ageing sites of Cerib at Epernon and c) La Rochelle at the base of Saint-Nicolas Tower (tidal range).

(éléments structurels). Elle s'inscrit dans la continuité de la recherche des projets APOS et CANOPEE. Les armatures sont en acier carbone, rond lisse, haute adhérence ou treillis (dans le cas des murs instrumentés). Le béton armé répond à 11 formulations différentes, sélectionnées parmi les 41 du projet national : B01, B02, B04, B05, B07, B31, B36, B37, B38, B39b et B40 (tableau 1) qui couvrent une large gamme de ciments (CEM I, CEM III, CEM V), de granulats (G1 à G4), d'additions (filler calcaire, filler siliceux, métakaolin, fumée de silice, cendres volantes), de plusieurs classes de résistance mécanique (de C25/30 à C50/60) et de conformité à la norme NF EN 206/CN ou non. Onze murs sont entreposés au Cerib à Épernon en environnement XC4 et 11 murs sont entreposés à La Rochelle en environnement XS3m (en zone de marnage). La figure 2 présente le schéma des murs et des deux sites de vieillissement naturel. De plus, deux fois trois murs instrumentés ont été fabriqués selon les formulations de béton B01, B04 et B31. Ils sont respectivement entreposés à l'Université Gustave Eiffel à Marne-la-Vallée (environnement XC4) et sur le site de production d'Eqiom à La Rochelle (environnement XS2 ou XS3e). La figure 3 présente le schéma des murs instrumentés et les deux sites de vieillissement naturel. Ces 28 corps d'épreuve, doublement identifiés (contre moule + puce RFID), ont été dimensionnés de manière à ce que leur suivi puisse se poursuivre au-delà du PN avec des auscultations pos-



© P. BARTHÉLÉMY, J. MAI-NHU ET V. BOUTELLER

3- Corps d'épreuves "murs instrumentés" :
a) instrumentation,
b) sites de vieillissement naturel de l'Université Gustave Eiffel à Marne-la-Vallée et
c) de Eqiom à La Rochelle.

3- "Instrumented wall" test specimens:
a) instrumentation,
b) natural ageing sites of Gustave Eiffel University in Marne-la-Vallée and
c) Eqiom in La Rochelle.

sibles à 5, 10, 15 et 20 ans d'âge. Les partenaires de cette seconde étude sont le Cerib, l'Université Gustave Eiffel, le Lrmh et le Lasie. Le suivi de la durabilité des différents corps d'épreuves en béton armé nécessite diverses caractérisations :

→ Pour les prismes, les caractérisations électrochimiques reposent sur des mesures de potentiel, de résistance de polarisation linéaire et d'impédance réalisées avec des potentiostats de laboratoire. La densité de courant de corrosion est ensuite calculée en prenant pour hypothèses le modèle de Randles et l'équation de Stern et Geary (la surface d'acier étudiée étant définie lors de la fabrication).

→ Pour les murs, les caractérisations portent sur la durabilité du béton d'enrobage (cylindres 11x22 cm et/ou carottages) et sur la corrosion des armatures :

- Les essais de durabilité permettent de caractériser la résistance mécanique, la résistivité électrique, le coefficient de migration des ions chlorure, la profondeur de carbonatation et les profils de pénétration des ions chlorure, etc. ;

- Les essais de corrosion avec les potentiostats de laboratoire et les matériels de terrain rendent compte des potentiels, des résistances, des résistivités, des densités de courant de corrosion, de la teneur en eau et des indices de salinité.



3a



3b



3c

© V. BOUTELLER ET PH. TURCRY

→ Pour les murs instrumentés, les capteurs (HMP110 Vaisala, ERE20 Force Technology, MRE Ibac et AL Ibac) enregistrent en continu, à l'aide d'un multiplexeur d'acquisition et d'un ordinateur, la température et l'humidité relative, les potentiels, les résistances et les courants. Les mesures CND précédentes sont également réalisées annuellement.

RÉSULTATS (2019-2021)

Quelques résultats, obtenus depuis le démarrage des deux études en 2019, sont présentés dans cet article.

ÉTUDE 1 - CORROSION DES PRISMES

Les résultats sur les prismes montrent qu'après environ 2 années :

- Les armatures dans les prismes témoins restent passives ;
- Il n'y a aucune trace de corrosion sur les prismes (laboratoire, maritime et carbonatation) excepté pour les prismes avec des ions chlorure au gâchage qui présentent des fissurations pour la formulation B04 pour la condition 45°C et 92% HR et en environnement naturel ;
- Le classement des prismes par ordre de résistance électrique est B31 > B04 > B01 ;
- Le classement des prismes par ordre de densité de courant de corrosion est B04 > B01 >>> B31 ;
- En milieu maritime, les ions chlorure ont pénétré jusqu'à 2 cm dans la formulation B01.

ÉTUDE 2 - CORROSION DES CORPS D'ÉPREUVE

Certains résultats obtenus sur les murs sont présentés sur les figures 4, 5 et 6. Les résistivités des murs entreposés en zone de marnage à La Rochelle (figure 4 histogramme), mesurées à l'aide d'un matériel de terrain Resipod (type Wenner), montrent que les formulations B01, B04, B07, B36 et B40 ont les résistivités les plus faibles. Pour des résistivités de l'ordre de 100 kOhm.cm, le risque de corrosion associé est élevé, d'après les travaux du groupe Rilem TC154. Les résultats des essais de résistivité menés au laboratoire (selon la norme XP P 18-481) sur des éprouvettes non armées ne sont pas toujours en accord avec les résistivités mesurées sur les murs sur site, qui sont affectées par la teneur en eau et en ions chlorure dans le béton mais également par les conditions environnementales, en particulier la température. ▷

4- Résistivité des onze murs entreposés sur le site de vieillissement de La Rochelle (en zone de marnage) avec des matériels de terrain (histogrammes) et données de résistivité obtenues en laboratoire.

5- a) Résistance, b) potentiel et c) densité de courant de corrosion des onze murs entreposés sur le site de vieillissement de La Rochelle (en zone de marnage) - Résultats obtenus avec un potentiostat.

4- Resistivity of the eleven walls stored on the La Rochelle ageing site (in the tidal range area) with field material (histograms) and resistivity data obtained in the laboratory.

5- a) Resistance, b) potential and c) current density of corrosion of the eleven walls stored on the La Rochelle ageing site (in the tidal range area) - Results obtained with a potentiostat.

Une analyse approfondie est nécessaire afin de prendre en compte les paramètres environnementaux qui peuvent influencer les mesures sur site.

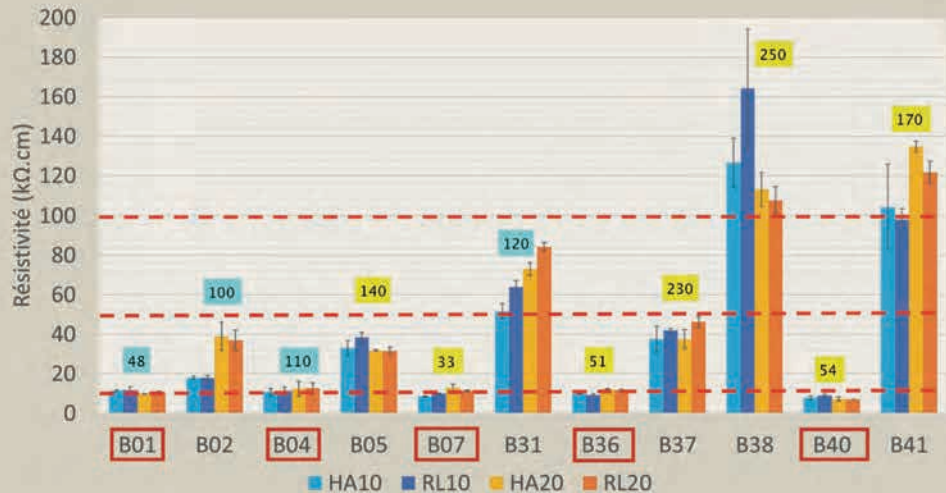
La figure 5 présente les résultats pour les 11 murs entreposés en zone de marnage à La Rochelle.

Les mesures de potentiel et de résistance ont été prises avec un potentiostat transportable et les valeurs de densité de courant de corrosion ont été calculées.

Les résultats montrent que les résistances les plus élevées sont observées pour les murs B38, B41 et B31. Ces résultats sont en accord avec ceux de la figure 4.

RÉSISTIVITÉ DES ONZE MURS ENTREPOSÉS SUR LE SITE DE VIEILLISSEMENT DE LA ROCHELLE (EN ZONE DE MARNAGE)

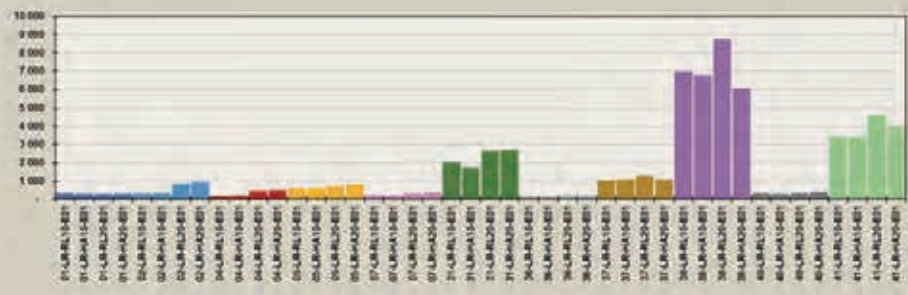
avec des matériels de terrain (histogrammes) et données de résistivités obtenues en laboratoire



4

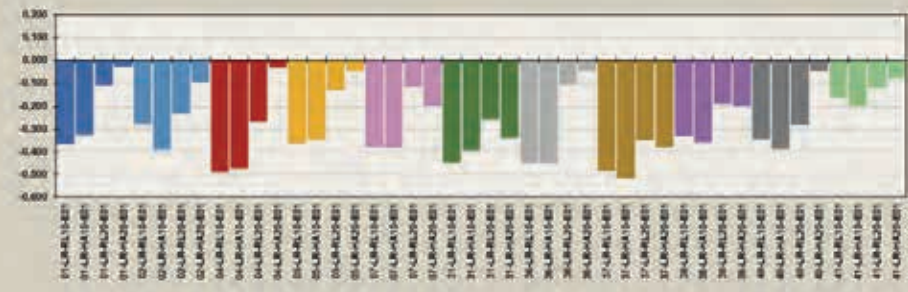
© E. MARIE-VICTOIRE ET J. MAFFRU

RÉSISTANCE (Ohm)



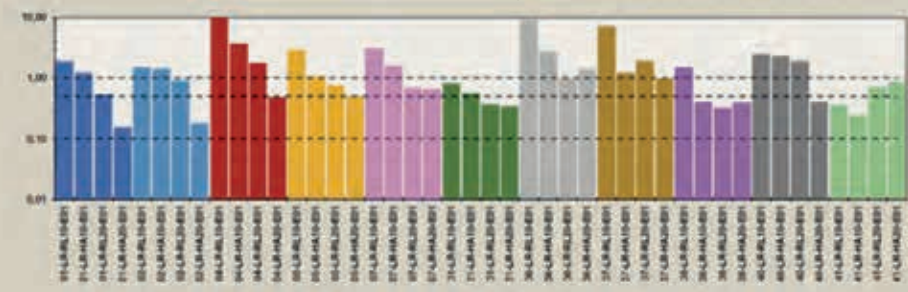
5a

POTENTIAL (V, ECS)



5b

DENSITÉ DE COURANT DE CORROSION (µA/cm²)

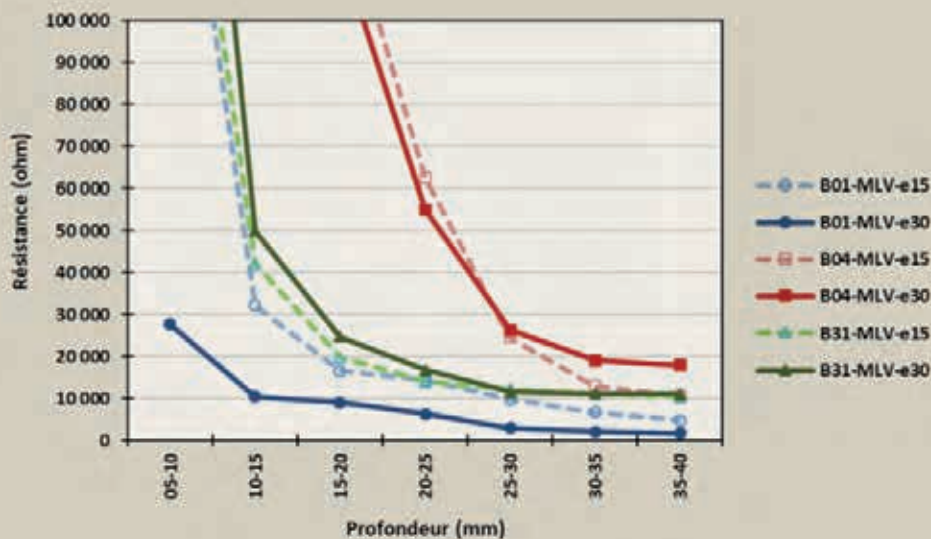


5c

© V. BOUTELLER

PROFILS DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DES TROIS MURS INSTRUMENTÉS EXPOSÉS À MARNE-LA-VALLÉE

(faces 15 et 30 mm d'enrobage, après 315 jours (dont 224 jours au Cerib))



6- Profils de résistance électrique des trois murs instrumentés exposés à Marne-la-Vallée (faces 15 et 30 mm d'enrobage, après 315 jours (dont 224 jours au Cerib)).

6- Electrical resistance profiles of the three exposed instrumented walls in Marne-la-Vallée (15 mm and 30 mm coating faces, after 315 days - including 224 days at the Cerib).

6

Les résultats de potentiel et de densité de courant de corrosion laissent penser que les armatures des faces d'enrobage faible (10 mm) corrodent pour les formulations B04, B36, B37, B40, B05, B02 et B01 (valeur > 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Une recherche plus approfondie est nécessaire pour mieux cerner ces résultats car une corrosion aussi rapide est inattendue. Les paramètres de pH des nouvelles formulations et les teneurs en eau et en oxygène relatives au site de vieillissement naturel sont à explorer.

La figure 6 présente les profils de résistances selon plusieurs profondeurs (capteur multiring electrode MRE) des

3 murs instrumentés entreposés à l'Université Gustave Eiffel, 315 jours après la fabrication des murs et incluant 91 jours à Marne-la-Vallée. Les résultats montrent que les formulations avec des ciments aux laitiers (B04 et B31) ont des résistances plus élevées que la formulation avec du ciment Portland B01. Ces résultats sont en phase avec les mesures de résistivité réalisées en laboratoire.

Le capteur MRE pourrait servir de capteur d'alerte pour la carbonatation ou la pénétration des ions chlorure dans le béton et renseigner du risque de corrosion des armatures individuelles et des armatures du treillis, qui ont des enro-

bages de béton respectifs de 15 mm et de 30 mm. En effet, les mesures des différents anneaux du capteur MRE sont comprises entre 7 et 37 mm de profondeur.

CONCLUSIONS

Les études sur la corrosion des armatures dans 11 formulations de béton, choisies parmi les 41 formulations du PN PerfDuB, présentent des résultats très intéressants complémentaires à ceux issus de l'approche performantielle du béton d'enrobage. Les premiers résultats sur les prismes soulignent le besoin de compréhension entre la microstructure et le compor-

tement en corrosion, notamment dans des conditions des tests accélérés au laboratoire. Les données obtenues sur les murs in situ à l'aide de matériels de laboratoire, de terrain et l'instrumentation en continu, seront analysées au fur et à mesure du vieillissement des corps d'épreuve dans les différents sites de vieillissement.

Des financements spécifiques seront nécessaires à la poursuite de ces deux études, à visée de 20 ans, qui ont déjà mobilisé des laboratoires de recherche, mais également des entreprises et des collectivités territoriales (Vinci, Eiffage, Egiom, Ville de La Rochelle, Port de plaisance de La Rochelle). □

ABSTRACT

REINFORCED CONCRETE CORROSION IN THE PERFDUB NATIONAL PROJECT IN LABORATORY AND ON-SITE

VÉRONIQUE BOUTEILLER, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL, MAST-EMGCU - SANDRINE CHANUT, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - JONATHAN MAI-NHU, CERIB - ÉLISABETH MARIE-VICTOIRE, LRMH - PHILIPPE TURCRY, LASIE, LA ROCHELLE UNIVERSITÉ, UMR 7356 CNRS

Under the PerfDuB National Project, research on the corrosion of carbon-steel rebars in 11 concrete mix designs was initiated in 2019. There are numerous study parameters: concrete mix design, the size of test specimens, contaminations (carbonation and chloride ions), environmental conditions, natural ageing sites, investigation methods (one-off or continuous) and time. The aim is to establish a database on the corrosion resistance of reinforced concrete. These results are complementary to those obtained in the performance-based approach. Taken together, they could be useful for modelling the long-term durability of reinforced concrete. □

LA CORROSIÓN DE LOS HORMIGONES ARMADOS DEL PROYECTO NACIONAL PERFDUB EN EL LABORATORIO E IN-SITU

VÉRONIQUE BOUTEILLER, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL, MAST-EMGCU - SANDRINE CHANUT, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - JONATHAN MAI-NHU, CERIB - ÉLISABETH MARIE-VICTOIRE, LRMH - PHILIPPE TURCRY, LASIE, LA ROCHELLE UNIVERSITÉ, UMR 7356 CNRS

En el marco del Proyecto Nacional PerfDuB, en 2019 se inició el estudio de la corrosión de las estructuras de acero carbono en 11 formulaciones de hormigón. Los parámetros de estudio son numerosos: la formulación de los hormigones, el tamaño del cuerpo de prueba, la contaminación (carbonatación e iones de cloruro), las condiciones medioambientales, los puntos de envejecimiento natural, los modos de investigación (puntual o continua) y el tiempo. El objetivo es crear una base de datos sobre la resistencia a la corrosión del hormigón armado. Estos resultados complementan los obtenidos en el enfoque basado en el rendimiento, y conjuntamente podrán utilizarse para modelizar la durabilidad del hormigón armado a largo plazo. □



1
© NICOLAS VERCELLINO

IMPRESSION 3D BÉTON : DES PREMIERS ESSAIS À L'INDUSTRIALISATION DES CHANTIERS

AUTEURS : SÉBASTIEN PINON, CHEF DE PROJET INNOVATION TECHNIQUE, SPIE BATIGNOLLES -
FÉLIX BLAMPAIN, DOCTORANT CHARGÉ DE MISSIONS R&D, INNOVATION TECHNIQUE BTP 4.0, SPIE BATIGNOLLES -
ROMAIN DUBALLET, PHD. ING., CO-FOUNDER XtreeE STUDIO, XtreeE

L'IMPRESSION 3D PERMET L'ALLIANCE DU SUR-MESURE, DE L'INDUSTRIALISATION ET DE LA CONSTRUCTION DURABLE. AVEC LA ROBOTISATION ET LA NUMÉRISATION DES CHANTIERS, L'IMPRESSION 3D INVITE À RÉINVENTER LA FAÇON DE CONCEVOIR ET D'OPTIMISER LA PRODUCTION D'OUVRAGES EN BÉTON AINSI QUE LE MATÉRIAU EN LUI-MÊME, POUR S'ADAPTER AUX ENJEUX DE DÉVELOPPEMENT DURABLE ET AUX ÉVOLUTIONS DE L'INDUSTRIE. RETOURS D'EXPÉRIENCES DE SPIE BATIGNOLLES ET D'XTREEE SUR LA NAISSANCE DE CETTE NOUVELLE FILIÈRE ET SUR SES PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT.

INTRODUCTION

En comparaison avec d'autres secteurs industriels, le domaine de la construction n'a pas évolué autant ou aussi vite au cours des décennies passées. Parallèlement, la consommation de béton a fortement augmenté à tel point que celui-ci est devenu le matériau le plus

utilisé dans le monde, ce qui n'est pas sans conséquence sur le plan environnemental. L'usage de la fabrication additive est récent dans la construction mais augure un réel bouleversement des pratiques. Les premières réalisations commerciales de grande ampleur ont été imprimées en 2014-2015. En France,

le développement de robots à grande échelle a permis aux projets d'impression 3D de béton de se multiplier. La start-up française XTreeE fondée en 2015 est spécialiste de l'impression 3D de grandes dimensions et s'adresse aussi bien aux maîtres d'œuvre qu'aux entreprises de BTP.

Les recherches du groupe de BTP Spie Batignolles portant sur l'automatisation des procédés de construction et sur les nouveaux modes constructifs ont conduit le groupe à investir en 2021 dans cette solution d'impression 3D. Dans la genèse du projet, le groupe s'est d'abord intéressé à la réalisation

2- Une problématique de terrain récurrente, les réservations.
3- Modélisation numérique des boîtes, prototypage et mise en œuvre.

2- A recurring problem in the field, empty boxes in walls.

3- Digital modeling of boxes, prototyping and implementation.



© PHOTOTHÈQUE SPIE BATIGNOLLES

de petites pièces répliquables qui permettrait de gagner en productivité sur les chantiers, plutôt que de chercher à fabriquer des pièces plus complexes mais peu reproductibles et pour lesquelles l'absence de norme limite les applications.

UNE PREMIÈRE APPROCHE : FAIRE SIMPLE ET RÉPLICABLE

La démarche de Spie Batignolles vise à automatiser et optimiser des processus fastidieux et générateurs de déchets en bois, de malfaçons et de pertes de temps.

Un premier cas d'usage se concentre sur les boîtes de réservation (figure 2). Spie Batignolles s'est donc intéressé de près à ces boîtes indispensables pour faire passer les réseaux techniques dans le gros-œuvre. Elles sont faites en plaçant une boîte en bois dans le coffrage et sont retirées après coulage. Leur utilisation induit régulièrement des opérations de reprise pénibles. La fabrication d'un tel objet n'a que peu de valeur ajoutée et génère des dépenses souvent mal estimées. Les premières boîtes de réservation imprimées en 3D ont donc vu le jour pour pallier ces problèmes (figure 3). La fabrication additive apporte une valeur ajoutée sur le plan écologique et économique en réduisant la matière utilisée et en minimisant les malfaçons, ainsi que sur le plan humain car elle soulage les compagnons sur certaines tâches et réduisent leur intervention dans des situations dangereuses. Les premiers retours d'expérience des équipes de chantier sont positifs.

La manutention de ces nouvelles boîtes est similaire à celle des boîtes en bois et elle apporte un gain de temps non négligeable puisque ces boîtes n'ont pas besoin d'être retirées après coulage et que leur fabrication se fait en temps masqué. Des points restent à améliorer pour rendre la solution totalement viable : trop grandes ou trop petites, les boîtes s'intègrent mal au coffrage et la maîtrise de leur poids reste un enjeu important.

L'automatisation des procédés de fabrication des boîtes de réservation pourrait faciliter une homogénéisation de la production en respectant des dimensions précises standardisées qui ne sont pas permises par les boîtes en bois. Ce nouveau procédé d'impression 3D béton permet surtout d'introduire l'usage de la maquette numérique au service des chantiers, élément-clé pour permettre l'industrialisation de nos modes constructifs.



© PHOTOTHÈQUE SPIE BATIGNOLLES

3

4- L'impression 3D béton de coffrage supprime des tâches sans valeur ajoutée.

5- Le 1^{er} robot Spie Batignolles est en activité et produit des ouvrages en béton, une petite révolution.

6- Le Designer Fabrication Additive au plus près de la matière et du robot.

4- 3D concrete printing of formwork eliminates tasks providing no value added.

5- The first Spie Batignolles robot is in service producing concrete structures, a small revolution.

6- The Additive Manufacturing Designer in very close contact with the material and the robot.

Dès lors, l'usage de la réalité augmentée via la maquette BIM devient possible pour implanter et contrôler ces réservations sans erreur. L'impression 3D béton s'inscrit donc également dans la démarche de *lean construction* du groupe en supprimant des tâches à non-valeur ajoutée (figure 4).



© PHOTO THEQUE SPIE BATIGNOLLES

4

D'un cas d'usage relativement basique, on voit naître de nouveaux métiers et de nouvelles compétences. Le compagnon qui réalisait auparavant les tâches pénibles de décoffrage des boîtes de réservation sur les chantiers participe désormais à la production des ouvrages en atelier grâce au robot (figure 5). La conception, les simulations et la programmation sont réalisées par le Designer Fabrication Additive du groupe (figure 6).

MAÎTRISER PLUS DE COMPLEXITÉ

Ce nouvel outil et les métiers qui l'utilisent ouvrent la voie à la réalisation de formes en béton plus complexes,

jusqu'alors non conventionnelles. Le béton imprimé ne pouvant pas encore être considéré comme un élément structurel dans un ouvrage, les impressions sont donc utilisées à l'heure actuelle comme coffrages perdus, mais des évolutions devraient voir le jour prochainement. Deux types de production sont à l'étude actuellement. D'une part des pièces avec une géométrie complexe et peu reproductible, à produire pour les besoins précis d'un projet, par exemple les coffrages de nœud de poutres (figure 7). D'autre part, des pièces standardisées réalisées dans une logique de ligne de produits, c'est-à-dire des éléments utilisables sur plusieurs projets similaires, comme

des coffrages perdus de longrine, des réservations pour douche encastrée, et dont les dimensions seraient contrôlées et adaptées en fonctions des contraintes techniques des projets.

Le domaine du mobilier urbain et des aménagements extérieurs est également propice à la réalisation de produits à la fois standardisés et personnalisables.

La réalisation de ces pièces, comme un coffrage de poteau architectural (figure 8), demande toutefois d'élaborer de nouveaux processus de conception et d'exécution. Côté conception, les outils et méthodes de travail sont déjà opérationnels et permettent de concevoir des formes de plus en plus libres



5

© NICOLAS VERCELLINO



6

© NICOLAS VERCELLINO

à partir de maquettes numériques. Le passage automatique à la réalisation est encore sujet à expérimentations. Un traitement des maquettes numériques est nécessaire pour traduire la forme 3D en ordres d'impression. Ce travail, bien que partiellement automatisé, demande une adaptation spécifique pour chaque type de pièce afin de les découper en sous-parties pour définir le cheminement de l'imprimante.

7- L'impression 3D offre une alternative intéressante au coffrage traditionnel de nœud de poutres complexes.

8- Des essais sur le matériau béton imprimable sont réalisés en atelier pour garantir la qualité d'impression.

7- 3D printing offers an interesting alternative to traditional formwork for complex girder truss joints.

8- Tests on the printable concrete material are performed in workshop to ensure printing quality.



© PHOTO THÉQUE SPIE BATIOGNOLLES

7



© PHOTO THÉQUE SPIE BATIOGNOLLES

8

Après conception d'un modèle 3D, celui-ci est envoyé à une plateforme numérique de gestion pour préparer et contrôler l'impression. Du béton à haute performance est préparé puis envoyé à l'aide d'un système de gavage à la tête d'impression fixée à un bras robot six axes. Celui-ci dispose les couches de béton appelées cordons. La tête d'impression est le cœur de la technologie permettant d'activer la structuration au jeune âge du béton déposé, en contrôlant les caractéristiques à chaque instant pour les adapter à la géométrie du projet. La prise du béton n'est pas perturbée, garantissant ainsi les propriétés mécaniques finales. Cependant ces procédés innovants nécessitent encore de nombreuses campagnes d'essais mécaniques (figure 9) car ils ne sont pas encore certifiés.

Cette nouvelle technologie invite à repenser les modes de conception. De nouvelles possibilités créatives sont offertes aux architectes et au designers, et ce à moindre coût. Les projets construits sont à présent envisageables comme des séries d'éléments uniques, et non plus contraints par la standardisation (figure 10).

Qualité architecturale, personnalisation, et créativité ne sont plus synonymes de luxe. L'exemple du projet Villiaprint de cinq maisons à Reims, dont les 35 murs de la façade Sud ont chacun une forme unique, montre la réelle plus-value architecturale apportée par l'impression 3D à ces habitats sociaux (figure 11). Ce projet est réalisé avec des techniques de construction hors-site. Les murs sont imprimés en béton, la toiture végétalisée est réalisée en CLT, et des modules Nord en bois et métal. Le projet est foncièrement hybride, il utilise chacun des matériaux de construction à bon escient. Chaque élément est modulaire, préfabriqué en usine, et assemblé sur site. L'impression 3D, et la fabrication robotisée hors-site en général, s'accrochent très bien de projets composés de multiples formes uniques. Des applications commencent à voir le jour en bâtiment, en génie civil ou travaux publics, comme les voussoirs de passerelle ou les ouvrages d'assainissement.

UN OUTIL SUPPLÉMENTAIRE POUR RÉPONDRE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

L'objectif environnemental est bien sûr en première ligne et il peut être envisagé de plusieurs manières. Le premier levier est celui des matériaux de construction.

Des encres d'impressions aux propriétés dites bas-carbone sont en développement pour réduire l'impact climatique des produits de construction, comme de nouveaux ciments ou des géopolymères. On peut également citer l'adaptation des encres aux milieux sous-marins, pour l'élaboration de structures favorisant la biodiversité comme les récifs artificiels (figure 12). Autre axe de travail important, la localité, l'objectif est de choisir l'encre la plus pertinente selon la maturité industrielle de la région et la disponibilité géographique des ressources. À terme, chaque matériau imprimé doit être sourcé le plus localement possible et formulé de manière à favoriser un équilibre performance/impact.

Le deuxième levier environnemental, non négligeable, est celui de la sobriété en matériaux. L'allègement des structures est facteur de réduction drastique d'impact environnemental, particulièrement pour des ouvrages dont le dimensionnement est gouverné par leur efficacité mécanique. Des études d'analyses de cycle de vie ont permis d'élaborer des outils de quantification de l'impact de ces nouvelles pratiques industrielles. Ces études ont montré que des réductions d'impact de l'ordre de 25 % peuvent être envisagées pour des ouvrages de franchissement type passerelle.

La mise en place de stratégie de conception multicritères, en élaborant des formes répondant à des objectifs divers (thermique, acoustique, éclairage, ventilation naturelle, et même accommodation d'espèces animales) est une pratique grandissante. La complexité formelle est intrinsèquement liée à l'efficacité de telles démarches et l'impression 3D grande échelle a déjà permis d'élaborer des prototypes de tels produits. On peut citer par exemple le travail de H.P. Singh au sein du mastère spécialisé Digital Building Design de l'École des Ponts ParisTech qui concerne la conception bioclimatique et performantielle des façades urbaines. Il s'agit d'un assemblage d'éléments autobloquants, conçu comme une façade passive optimisée pour réduire la consommation d'énergie du bâtiment, et favoriser le confort thermique et visuel (figure 13). Chaque bloc est unique et d'une forme sophistiquée. La stabilité mécanique de la façade est assurée géométriquement, par une stratégie de blocage topologique qui permet un assemblage sans mortier tout en résistant aux sollicitations dynamiques. Cet exemple illustre la perti-



9 © NICOLAS VERGELINO



10

© PHOTOTHÈQUE XTREE



11

© FRANCK KAUFF

9- L'impression 3D offre la possibilité de créer des designs sur-mesure, même pour des ouvrages standard.

10- Rien de plus simple que de créer une série d'éléments uniques reconfigurable.

11- Première réalisation en France de logements sociaux en impression 3D XTreeE.

9- 3D printing makes it possible to create bespoke designs, even for standard structures.

10- Nothing easier than to create a rearrangeable series of unique elements.

11- First construction in France of social housing by XTreeE 3D printing.

nence économique de l'impression 3D pour réaliser des ouvrages selon une grille d'analyse et d'optimisation multicritères au travers d'une démarche de design itératif ou *generative design*.

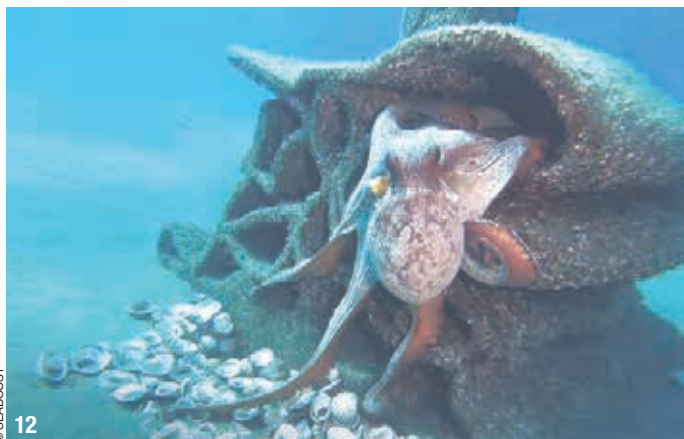
TRANSFORMER LA CHAÎNE DE PRODUCTION D'UN OUVRAGE EN BÉTON

L'arrivée d'une imprimante 3D au sein de l'appareil de production de Spie Batignolles modifie l'organisation des chaînes de production en place. Le groupe est désormais en mesure de préfabriquer des éléments hors site sans dépendre de partenaires extérieurs. Le site d'impression est installé au sein d'un parc matériel en Île-de-France et d'autres implantations en régions sont à l'étude pour se rapprocher des chantiers. Il devient alors nécessaire de repenser l'ensemble de la chaîne de production pour intégrer ce nouveau procédé de fabrication industrielle 4.0. Jusqu'à présent le recours à la préfabrication hors-site suivait un schéma organisé selon une logique de production en masse, standardisée, et d'un nombre important d'acteurs inter-

12- Des formulations spécifiques d'encres adaptées aux milieux permettent de créer des refuges à biodiversité sous-marins.
13- Concept de façade passive optimisée pour réduire la consommation d'énergie du bâtiment.

12- Specific mix designs for inks adapted to the environment, making it possible to create underwater biodiversity shelters.

13- Passive facade concept optimised to reduce the building's energy consumption.



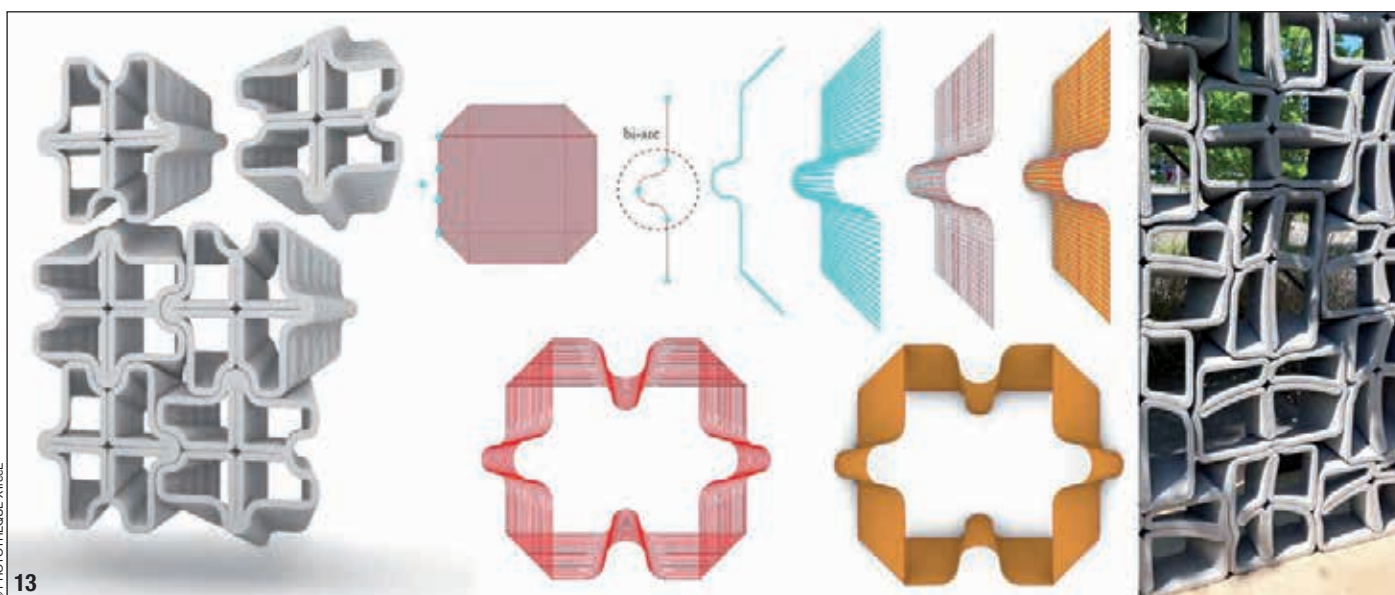
© SEARCOOST

médières. L'impression 3D, a contrario, permet de produire localement des pièces plus adaptées aux besoins techniques, financiers et esthétiques des projets, à partir d'une organisation plus restreinte.

La personnalisation permise par l'impression 3D facilite le rapprochement des acteurs d'un chantier pour concevoir et exécuter des ouvrages. De nouveaux processus de travail se créent alors pour tirer parti au mieux

de ce nouvel outil. Les relations entre architectes, ingénieurs d'études et responsables de travaux évoluent ; une réflexion plus détaillée en amont du chantier est nécessaire pour valider et démarrer une impression.

L'organisation et les activités de conception et d'exécution ne sont plus autant silotées et bénéficient pleinement de l'apport des outils numériques. Les processus BIM jouent alors un rôle central pour favoriser l'échange d'informations entre toutes les parties prenantes et assurer une réalisation fidèle à la conception. L'organisation plus décentralisée et plus horizontale amenée par l'impression 3D est permise grâce aux maquettes numériques qui centralisent et diffusent les informations nécessaires aux acteurs d'un projet pour organiser au plus juste les différentes activités de conception et de construction. □



© PHOTO THÉQUE XtreetE

13

ABSTRACT

3D CONCRETE PRINTING: FROM INITIAL TESTING TO INDUSTRIALISATION OF CONSTRUCTION SITES

SÉBASTIEN PINON, SPIE BATIGNOLLES - FÉLIX BLAMPAIN, SPIE BATIGNOLLES - ROMAIN DUBALLET, XtreetE

3D concrete printing makes it possible to work this material in a new way by drastically optimising the quantity of material and increasing creative freedom. The initial tests on simple, replicable structures allowed the Spie Batignolles group to rethink the uses of concrete and initiate an approach of industrialisation of construction sites. This technology is transforming the work methods of the construction and public works sector and allowing designers and constructors to call into question the suitability of the materials and construction techniques used in a step toward the hybridisation of materials and methods. At the interface of the issues of digital continuity and sustainable construction, 3D concrete printing illustrates the evolution of the construction and public works industry toward a model suited to the challenges of the 21st century. □

IMPRESIÓN DEL HORMIGÓN EN 3D: DE LOS PRIMEROS ENSAYOS A LA INDUSTRIALIZACIÓN DE LAS OBRAS

SÉBASTIEN PINON, SPIE BATIGNOLLES - FÉLIX BLAMPAIN, SPIE BATIGNOLLES - ROMAIN DUBALLET, XtreetE

La impresión del hormigón en 3D permite trabajar este material en una nueva forma, optimizando drásticamente la cantidad de material y aumentando la libertad de creación. Los primeros ensayos en obras simples y replicables permitieron al grupo Spie Batignolles reidear los usos del hormigón e iniciar un proceso de industrialización de las obras. Esta tecnología transforma los modos de trabajo en la construcción y las obras públicas, al tiempo que permite a los diseñadores y constructores cuestionar la pertinencia de los materiales y los modos de construcción empleados, para tender hacia una hibridación de materiales y métodos. En la confluencia de las problemáticas de la continuidad digital y la construcción sostenible, la impresión del hormigón en 3D ilustra la evolución del sector de la construcción y las obras públicas hacia un modelo adaptado a los retos del siglo XXI. □

LES BÉTONS BAS-CARBONE : ÉTUDE D'UN IMMEUBLE DE GRANDE HAUTEUR

AUTEURS : KATIA PALHAIS, INGÉNIEURE, ARCHITECTE, ÉQUIPE ÉCOCONCEPTION, SETEC TPI -
RAFAEL DIAS-SIMÕES, ARCHITECTE SPÉCIALISTE ENVIRONNEMENT, ÉQUIPE ÉCOCONCEPTION, SETEC TPI -
INGRID BERTIN, DOCTEUR EN SCIENCES INGÉNIERIE ENVIRONNEMENT, ARCHITECTE HMONP, SETEC TPI

RÉDUIRE LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA CONSTRUCTION, ET EN PARTICULIER L'IMPACT CARBONE, EST DEVENU UN CRITÈRE MAJEUR DE CONCEPTION. LES LEVIERS D'ACTION SONT MULTIPLES : CHOIX DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION, OPTIMISATION DE LA GÉOMÉTRIE STRUCTURELLE, RÉVISION DES CONTRAINTES ARCHITECTURALES, ETC. CETTE ÉTUDE PROPOSE L'ANALYSE DE VARIANTES BAS CARBONE POUR DIMINUER L'IMPACT DE LA STRUCTURE D'UNE TOUR À LA DÉFENSE, CONÇUE PAR SETEC TPI.



© DR

INTRODUCTION

D'après les études de l'observatoire des Bâtiments Basse Consommation, les éléments du gros-œuvre (fondations, infrastructure, superstructure) sont responsables d'un tiers des émissions de gaz à effet de serre de tout le cycle de vie d'un immeuble de bureaux. Pour les IGH, la structure est majoritairement réalisée en béton armé, principal responsable des émissions de l'ouvrage. L'émergence des bétons dits "bas carbone" dans le milieu de la construction apparaît comme une solution pertinente pour réduire l'empreinte carbone globale d'un bâtiment. Cependant, cette perspective de l'utilisation massive des

bétons "bas carbone" - en particulier ceux réalisés à partir de co-produits industriels (laitiers de hauts fourneaux, cendres volantes, fumée de silice etc.), sujets à des discussions d'allocation dans l'Analyse du Cycle de Vie - ne présentent pas une solution durable d'approvisionnement. Par exemple, les sources de laitiers de hauts fourneaux et de cendres volantes sont déjà utilisées dans leur presque totalité et, d'après la Société de l'Industrie Minérale (SIM), les laitiers ne représentent qu'environ 20% de la production totale de ciment à l'échelle française et européenne. Ils semblent donc être une solution à court terme, mais qui, à long terme,

devra coexister avec d'autres solutions "bas carbone" dont la ressource pourra être disponible en plus grande quantité (comme certaines argiles, des roches pouzzoloniques, du calcaire etc.). Pour la construction d'un IGH, avec des efforts importants à reprendre et un planning de chantier contraint, les choix de formulation des bétons doivent être anticipés pour répondre aux problématiques de mise en œuvre. Cet article propose une analyse de différents scénarios de conception d'un IGH (dimensionnement des sections, choix des matériaux, etc.) dans un objectif d'optimisation carbone du lot gros-œuvre.

QU'EST-CE QU'UN BÉTON BAS CARBONE ?

L'EMPREINTE CARBONE D'UN BÉTON

Un béton non armé est défini comme le mélange d'un liant hydraulique (ciment), de granulats (sable et gravillons), d'eau et éventuellement d'adjuvant(s), d'addition(s) et/ou d'ajout(s). Les propriétés du béton se développent par la prise du ciment, induite par son hydratation. Pour un béton dit "traditionnel" à base de ciment de Portland (type CEM I), la répartition massique des divers constituants est très différente de la répartition carbone (figure 1) : alors que le ciment ne représente que 12% de la

masse, il est à l'origine de 98 % de l'impact carbone du béton. Le ciment de type CEM I est composé d'au moins 95 % de clinker, principal responsable des émissions du liant, et l'étape de fabrication est source d'environ 90 % des émissions de la totalité du cycle de vie. Durant cette phase, 60 % du CO₂ émis est issu du processus de décarbonation du calcaire présent dans le cru : la cuisson du cru à 1450°C libère du CO₂ dans l'atmosphère et produit du clinker. Les 40 % restants sont à imputer à l'énergie consommée par le four.

LES BÉTONS "BAS CARBONE"

Aujourd'hui, les bétons "bas carbone" ne font pas l'objet d'une définition normalisée. Toutefois, il est d'usage de qualifier de "bas carbone" un béton qui génère moins d'émissions de gaz à effet de serre (comptabilisés en kgCO₂eq) qu'un béton de référence, dont les propriétés physiques, les performances mécaniques et les qualités d'usage et de durabilité sont équivalentes. La classe de résistance à la compression d'un béton est corrélée positivement à la quantité de ciment utilisée dans la formulation du béton. Ainsi, lors de la prescription d'un béton dit "bas carbone", il est important de préciser la classe de résistance, la classe d'exposition et le type de liant associé. Aujourd'hui, sur le marché du Béton Prêt à l'Emploi, certains liants

ne sont pas disponibles pour des classes de résistance élevée. Par exemple, sur le configurateur *BETi*e (Bétons et Impacts Environnementaux), qui permet de calculer les impacts environnementaux des bétons à partir de formulations préexistantes, il n'est pas possible de choisir un béton à base de ciment CEM III au-delà d'une classe de résistance C45.

LE CONTEXTE NORMATIF

Depuis mai 2021, la liste des ciments normalisés est passée de 27 à 38 familles, avec la publication de la norme nEN 197-5, caractérisée par l'intégration des ciments ternaires. L'objectif de cette norme était de proposer des ciments avec un taux de clinker réduit (figure 2), et donc un impact carbone potentiellement plus faible que

la plupart des ciments de la norme NF EN 197-1 (figure 3). À noter que, sur cette figure, la valeur d'impact prise en compte dans les calculs pour le laitier est de 17 kgCO₂eq/t, au lieu de 100 kgCO₂eq/t, nouvelle valeur parue en juin 2022, qui prend en compte 83 kgCO₂eq supplémentaire due à l'allocation économique des émissions de la filière fonte. Ceci implique, selon le pourcentage de laitier dans le ciment et le dosage de ciment dans le béton, une augmentation entre 5 et 10 % de l'impact carbone des bétons à base de CEM III.

Par ailleurs, il existe d'autres moyens d'utiliser des bétons avec un impact carbone réduit, tels que :

- L'approche performantielle (régie par la norme béton NF EN 206/CN et le Fascicule 65) dont l'objectif premier est de trouver la formulation la plus performante pour un usage et un environnement donnés, ce qui permet également de réduire l'impact, souvent via une économie de matière ;
- Le recours à d'autres liants alternatifs, comme les ciments sulfo-alumineux, les liants alcali-activés, les géopolymères, les ciments sur-sulfatés (norme NF EN 15743), les liants de type LC3 (en partie norme NF EN 197-5) ou encore les liants étringitiques (hors ciment sursulfaté).

Ces liants présentent un fort potentiel de réduction carbone, en particulier ceux qui ne sont pas formulés à partir de co-produits industriels. Cependant, la plupart de ces ciments alternatifs n'étant pas normalisés, le délai des essais en laboratoire nécessaires est donc à prendre en compte très amont si on ne souhaite pas retarder le chantier.

CAS D'ÉTUDE : UNE TOUR À LA DÉFENSE

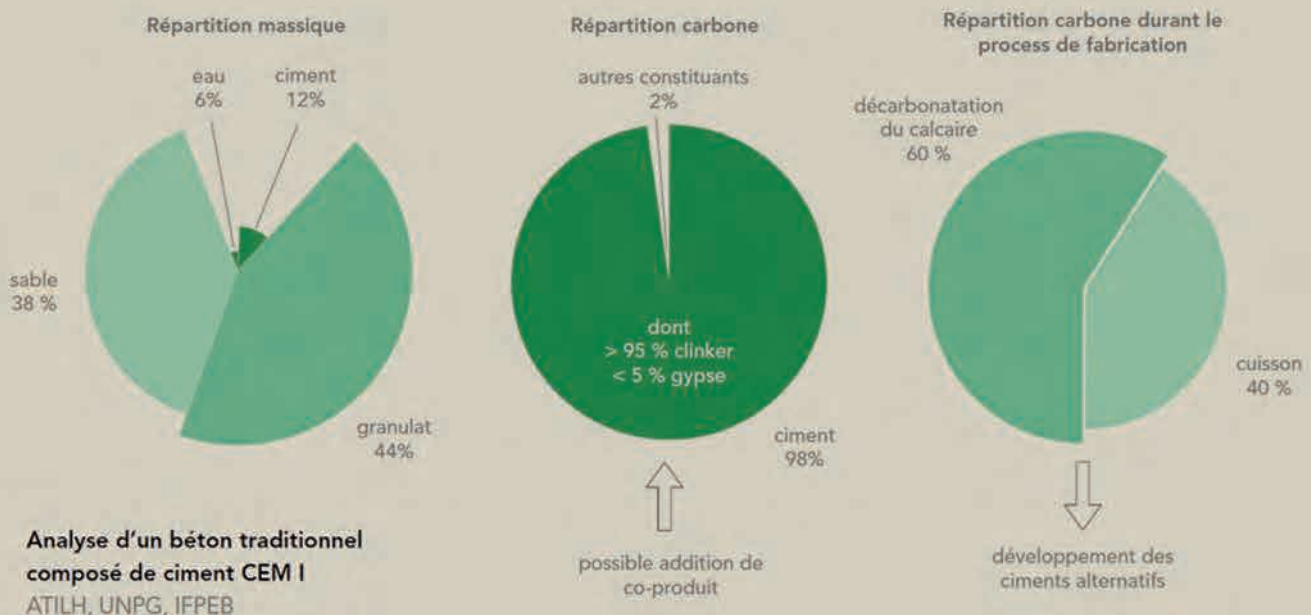
À partir de cet état de l'art, l'objectif est d'analyser des solutions "bas carbone" d'un projet d'IGH en cours d'études au sein de l'équipe Structures Complexes, à travers la comparaison de 3 scénarios (figure 4) :

- 1- Béton conventionnel - normalisé : utilisation de ciment CEM I ;
- 2- Béton "bas carbone" - normalisé : utilisation de CEM III ("bas carbone") et/ou CEM I ;
- 3- Béton "innovant" - non normalisé. Pour chaque scénario, plusieurs variantes sont étudiées et comparées sous l'angle des critères suivants :
 - L'impact sur le changement climatique (en kgCO₂eq) ;
 - Le dimensionnement et la classe de résistance du béton ;
 - Les problématiques de mise en œuvre et de planning chantier. ▷

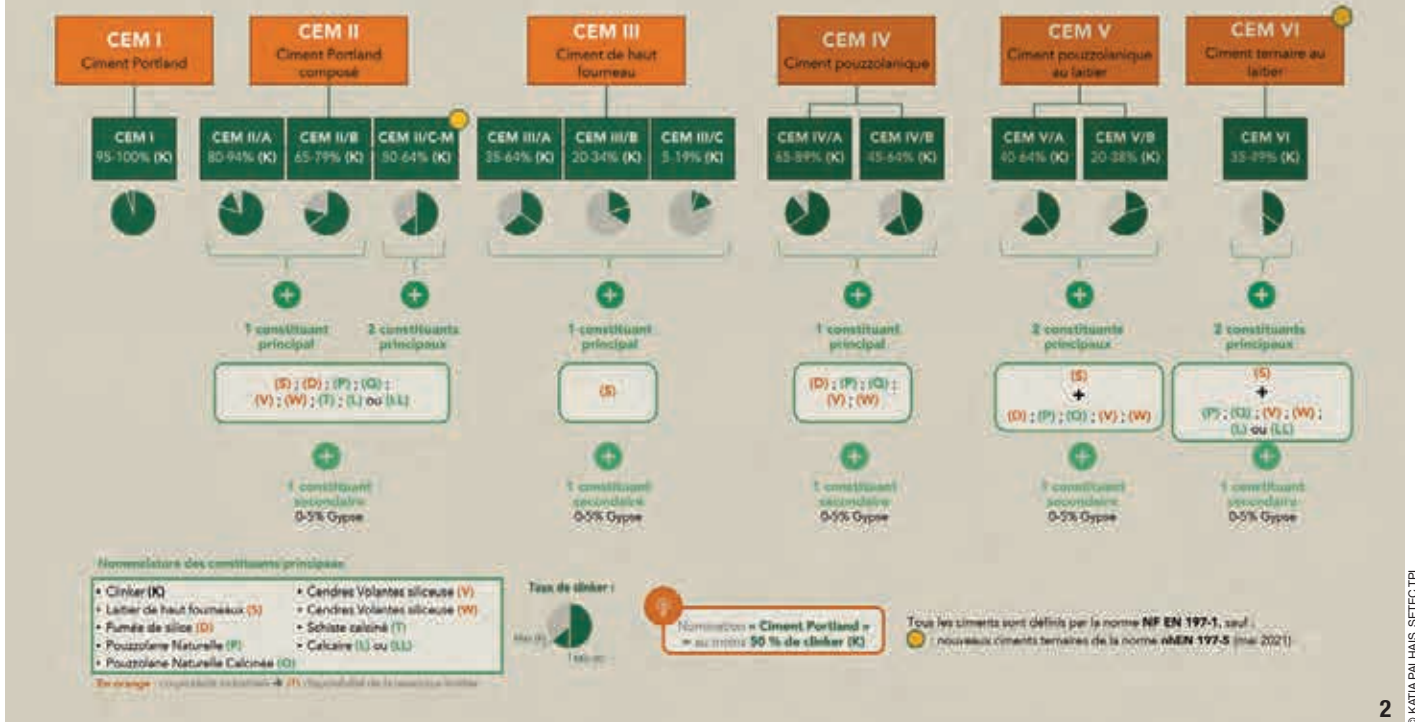
1- Comparaison des répartitions massique et carbone des constituants d'un béton traditionnel à base de CEM I.

1- Comparison of the mass and carbon distributions of the constituents of a conventional concrete based on CEM I.

COMPARAISON DES RÉPARTITIONS MASSIQUE ET CARBONE DES CONSTITUANTS D'UN BÉTON TRADITIONNEL À BASE DE CEM I



CARTOGRAPHIE DES CIMENTS "CLASSIQUES" DE LA NORME NF EN 197-1 ET DES NOUVEAUX DE LA NORME NHEN 197-5

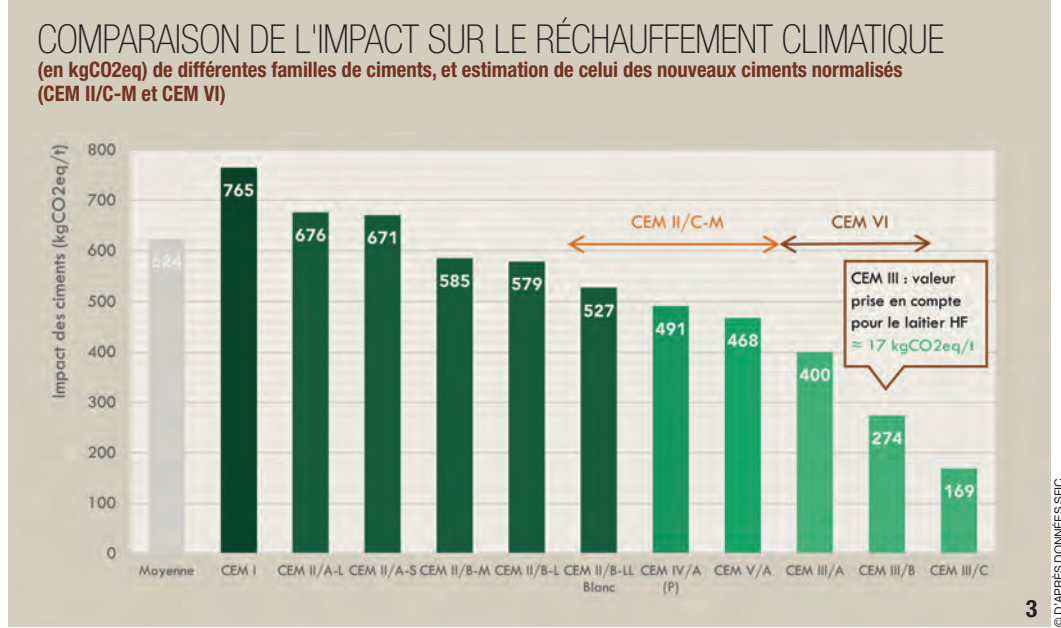


2- Cartographie des ciments "classiques" de la norme NF EN 197-1 et des nouveaux de la norme nhEN 197-5.

3- Comparaison de l'impact sur le changement climatique (en kgCO₂eq) de différentes familles de ciments, et estimation de celui des nouveaux ciments normalisés (CEM II/C-M et CEM VI).

2- Map of "conventional" cements of French standard NF EN 197-1 and the new cements of the nhEN 197-5 standard.

3- Comparison of the impact on climate change (in kgCO₂eq) of various cement families, and estimated impact of new standardised cements (CEM II/C-M and CEM VI).



La comparaison des variantes est réalisée indépendamment par type d'élément structurel (poteaux, voiles, planchers). Ce sont des éléments situés dans un espace intérieur, ils sont tous de classe d'exposition XC1. Un IGH est toujours découpé en "batterie", soit un groupement d'étages pour lesquels tous les verticaux (poteaux et voiles) ont les mêmes caractéristiques géométriques et matériaux. Le principe est de dimensionner l'élément le plus bas de chaque batterie. Pour la

tour étudiée, qui comprend 5 batteries, le dimensionnement s'effectue aux niveaux SS2, P00, D00, D016 et D31 (figure 5).

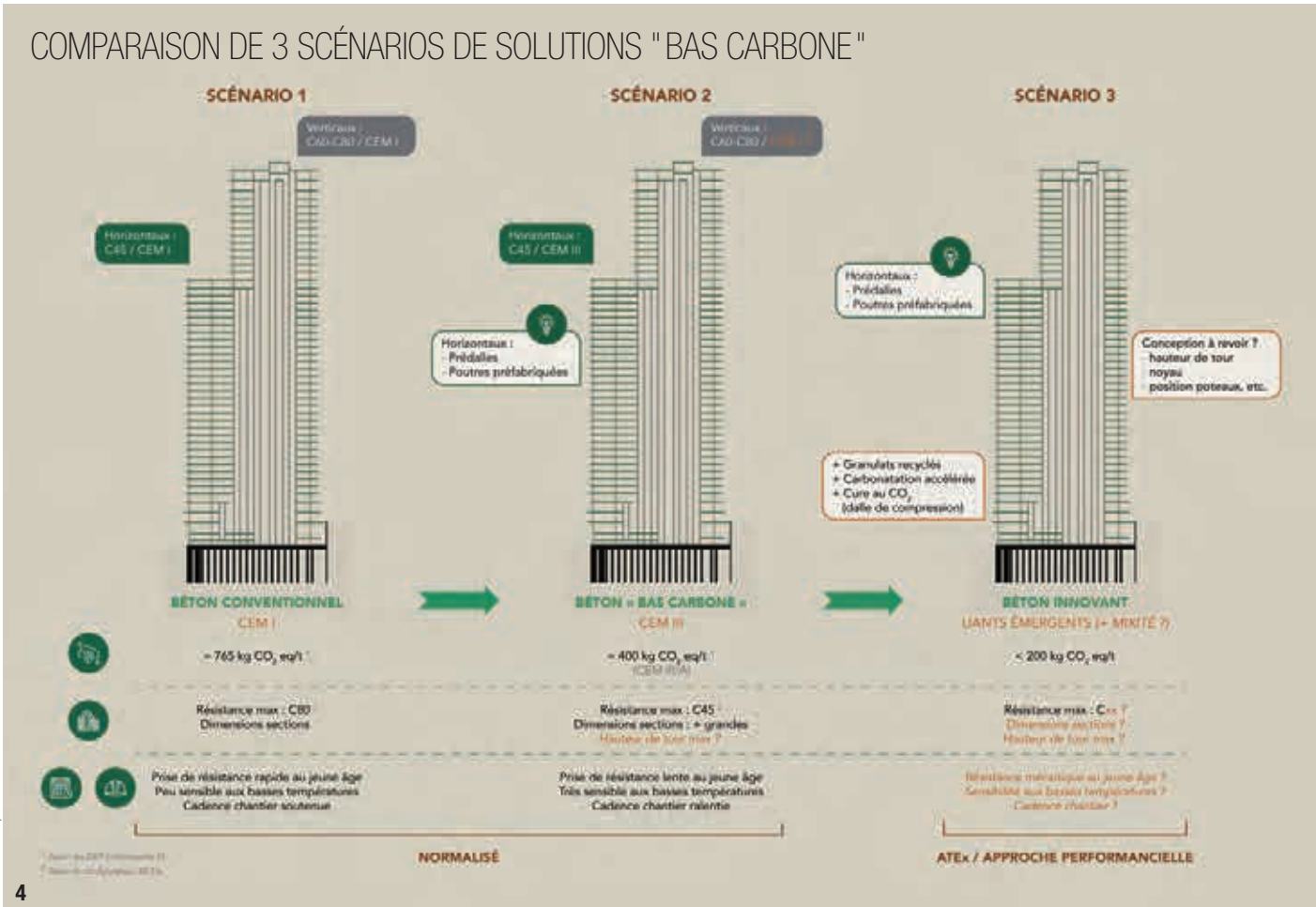
LES POTEAUX

Pour les poteaux, 10 variantes environnementales (nommées Var.x) ont été étudiées, à partir de 5 versions de prédimensionnements (nommées "Dim_x"), liées à la classe de résistance choisie. L'analyse se focalise sur un type de poteau, le plus chargé de la

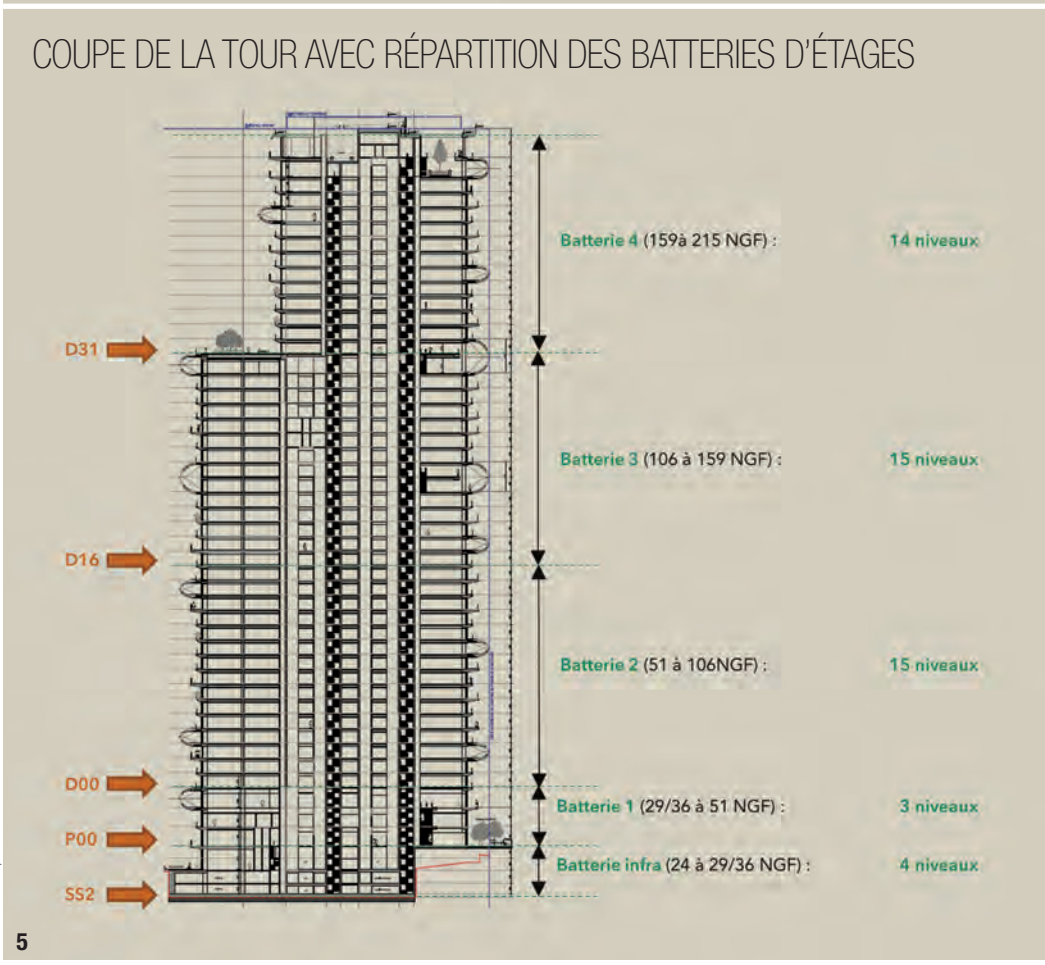
tour. La première hypothèse est d'avoir conservé la descente de charges calculée pour la variante "Base" - qui correspond au dimensionnement de la phase PRO de la tour.

Le prédimensionnement se fait sur la vérification de la contrainte de compression du béton non armé et d'une vérification au flambement. Le ratio d'acier est pris en compte dans les calculs environnementaux mais pas dans le dimensionnement, ce qui est une hypothèse conservatrice.

COMPARAISON DE 3 SCÉNARIOS DE SOLUTIONS "BAS CARBONE"



COUPE DE LA TOUR AVEC RÉPARTITION DES BATTERIES D'ÉTAGES



4- Comparaison de 3 scénarios de solutions "bas carbone".

5- Coupe de la tour avec répartition des batteries d'étages.

4- Comparison of 3 "low-carbon" solution scenarios.

5- Cross section of the tower with breakdown of storeys.

Le ratio d'acier des poteaux estimé est de 1,9% par rapport au volume de béton coulé. Cette valeur comprend à la fois les armatures longitudinales ainsi que les armatures de cadres et de mise en œuvre.
À partir des Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES), extraites de *BETie*, le calcul des impacts environnementaux est réalisé pour chaque variante en fonction du matériau et de la quantité de matière mise en œuvre.

TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES DE CHACUNE DES VARIANTES POUR LES POTEAUX

Batterie	Base « Dim_0 »	Var.1 « Dim_1 »	Var.2 « Dim_2 »	Var.1bis « Dim_1 »	Var.3 « Dim_3 »	Var.3bis « Dim_3 »	Var.4 « Dim_1&2 »	Var.5 « Dim_4 »	Var.6 « Dim_3 »	Var.6bis « Dim_2 »
Infra.	C50 CEM I	C80 CEM I	C50 CEM I	C80 CEM I	C45 CEM III/A	C45 CEM III/A (allocation) ¹	C50 CEM III/A ²	C150 BFUP ³	C45 LC3-50 ⁴	C50 LC3-50 ⁴
Super.	C80 CEM I	C80 CEM I	C50 CEM I	C80 CEM I	C45 CEM III/A	C45 CEM III/A (allocation) ¹	C80 CEM I	C150 BFUP ³	C45 LC3-50 ⁴	C50 LC3-50 ⁴
Aciers HA	69 % recyclés			98 % recyclés			Pas d'acier		98 % recyclés	
	Scénario 1			Scénario 2			Scénario 3			

¹ Avec un impact carbone pour le laitier HF de 100 kgCO₂eq/t (au lieu de 17), l'augmentation estimée pour un béton C50 CEM III/A est estimée à +6%

² La FDES utilisée pour le béton C50 CEM III/A est un REX d'un projet interne fournie par l'entreprise VICAT

³ Données issues d'une EPD BFUP – uniquement pour l'étape Production

⁴ Données en kgCO₂eq établies à partir de l'estimation du dosage des constituants selon la formule de Bolomey – uniquement pour l'étape Production

● /A aux co-produits industriels → disponibilité de la ressource limitée

6- Tableau des caractéristiques de chacune des variantes pour les poteaux.

7- Histogramme de comparaison des variantes pour les poteaux.

6- Table of characteristics of each variant for the columns.

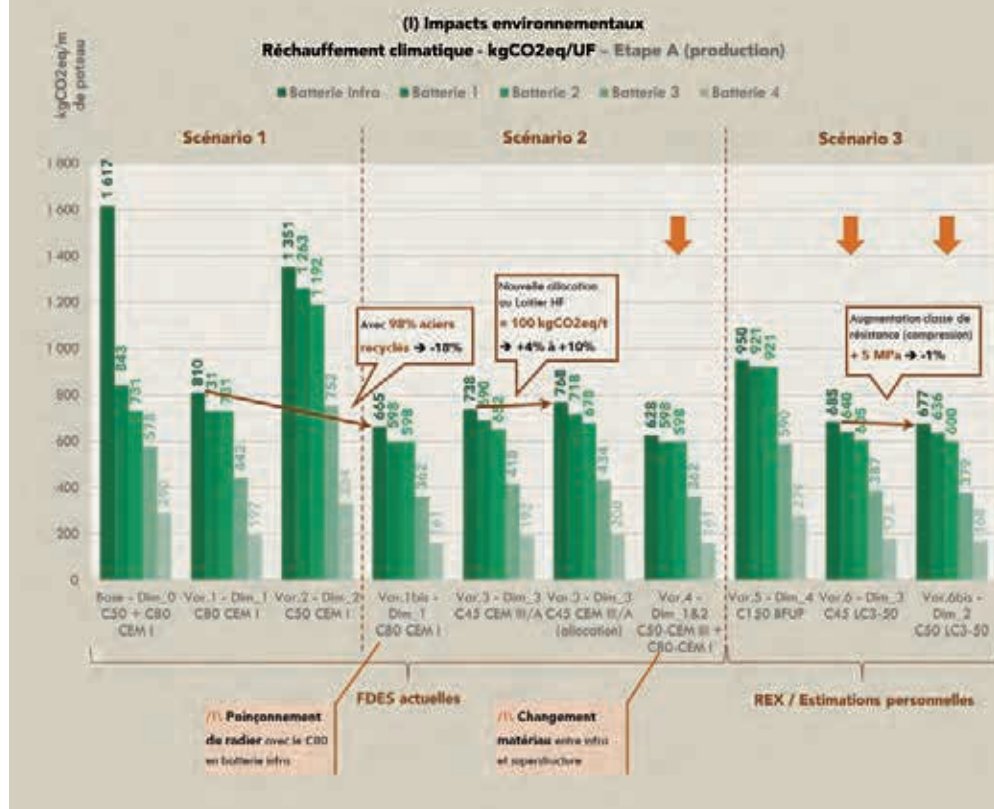
7- Bar chart comparing variants for columns.

Le tableau (figure 6) présente la classe de résistance liée au dimensionnement et les matériaux de chacune des variantes, ainsi que le type d'acier utilisé pour les armatures : avec un taux d'acier recyclé de 69% (scénario 1), ou de 98% (scénarios 2 et 3).

Les résultats (figure 7) sont présentés pour l'indicateur sur le changement climatique (en kgCO₂eq) uniquement pour la phase de production (étape la plus impactante) et pour la même unité fonctionnelle : 1 m linéaire de poteau qui reprend le chargement en pied de batterie.

Bien que le CEM III ait un poids carbone à la tonne plus faible que le CEM I, la Var.1bis (C80 CEM I) a un impact inférieur aux variantes 3 et 3bis, composées de béton C45 CEM III (dit "bas carbone"), grâce à la réduction de matière induite par l'utilisation d'un béton à haute performance C80. En revanche, l'utilisation de C80 en batterie infra peut engendrer des problèmes

HISTOGRAMME DE COMPARAISON DES VARIANTES POUR LES POTEAUX



de poinçonnement du radier. Ainsi, la Var.4 propose une solution hybride (C50 CEM III en infrastructure + C80 CEM I en superstructure), qui admet une meilleure répartition des contraintes à l'interface poteau-radier et présente les impacts carbone les plus faibles parmi toutes les solutions étudiées. Pour la solution en BFUP (Var.5), béton fibré à ultra haute performance, la classe de résistance élevée ne suffit pas à compenser le poids carbone élevé du matériau par une réduction de matière. Enfin, l'estimation des impacts

de ciment ternaire LC3-50 (clinker, argiles calcinées et calcaire) montre des résultats équivalents à la Var.1bis avec des classes de résistances C45 et C50. Ce nouveau liant, non commercialisé, semble être une piste intéressante de réduction carbone pour l'avenir : les premiers essais concluent à une performance mécanique supérieure au ciment de Portland.

LES VOILES

L'étude des voiles suit la même logique que celle des poteaux, avec

11 variantes et 5 versions dimensionnelles, calculées à l'étage inférieur de chaque batterie. Le noyau de la tour est composé de 2 voiles longitudinaux et 5 voiles transversaux. Pour simplifier la mise en œuvre, les voiles longitudinaux (et respectivement transversaux) d'une même batterie ont la même épaisseur. Le ratio d'acier pour les voiles est de 1,5. En plus de la contrainte de compression, le cisaillement induit par les efforts de vent est vérifié pour les voiles. La prise en compte de l'inertie globale du noyau de toute la tour permet de

TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES DE CHACUNE DES VARIANTES POUR LES VOILES

Batterie	Base - « Dim_0 »	Var.1 - « Dim_1 »	Var.2 - « Dim_2 »	Var.3 - « Dim_3 »	Var.1bis - « Dim_1 »	Var.4 - « Dim_4 »	Var.4bis - « Dim_4 »	Var.5 - « Dim_3 »	Var.5bis - « Dim_3 »	Var.6 - « Dim_3 »	Var.7 - « Dim_3 »	
Infra.						C60 CEM I	C60 CEM II/A-S					
B1												
B2	C60 CEM I	C60 CEM I (optimisé)	C80 CEM I	C50 CEM I	C60 CEM I (optimisé)	C50 CEM I	C50 CEM III/A	C50 CEM III/A	C50 CEM III/A (allocation)	C50 CEM II/C-M (S-LL) ^d	C50 CEM VI (S-LL) ^d	
B3						C35 CEM I	C35 CEM III/A					
B4						C30 CEM I	C30 CEM III/A					
Aciers HA	69 % recyclés				98 % recyclés				98 % recyclés			
	Scénario 1				Scénario 2				Scénario 3			

¹ Optimisation épaisseur des transversaux - B2 à B4

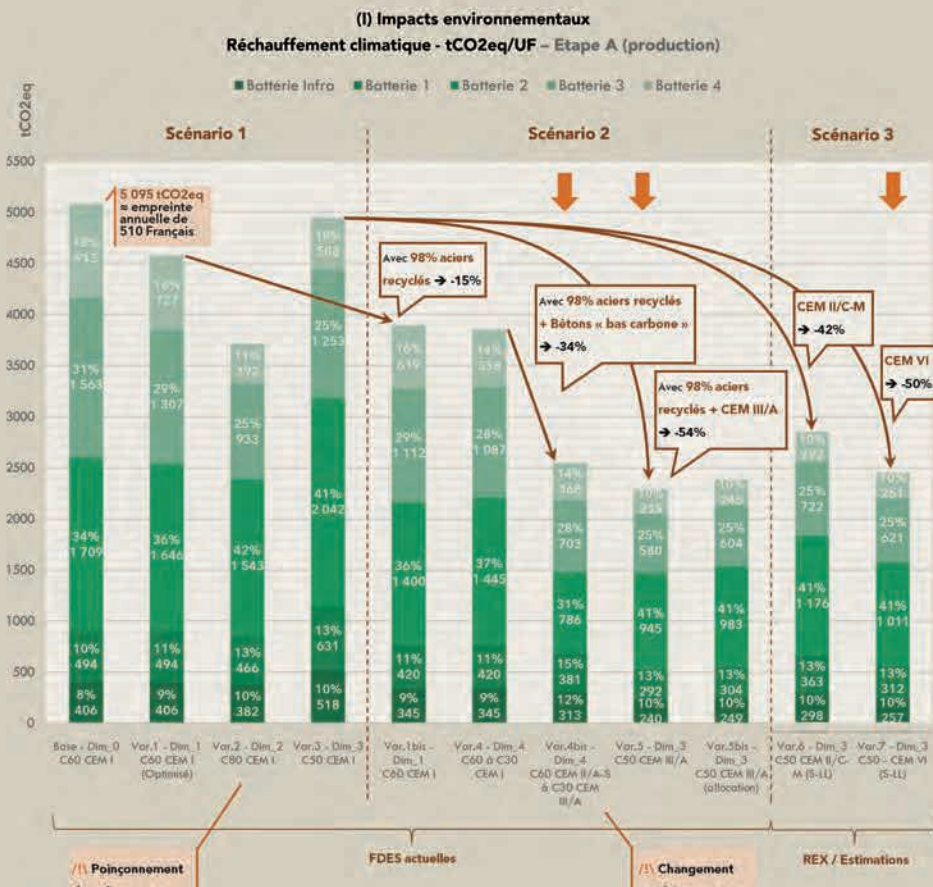
² La FDES utilisée pour le béton C50 CEM III/A est un REX d'un projet interne fournie par l'entreprise VICAT

³ Avec un impact carbone pour le laitier HF de 100 kgCO₂eq/t (au lieu de 17), l'augmentation estimée pour un béton C50 CEM III/A est estimée à +6%

⁴ Données en kgCO₂eq établies à partir de l'estimation du dosage des constituants selon la formule de Bolomey - uniquement pour l'étape Production

● : / \ aux co-produits industriels → disponibilité de la ressource limitée

HISTOGRAMME DE COMPARAISON DES VARIANTES POUR LES VOILES



8- Tableau des caractéristiques de chacune des variantes pour les voiles.

9- Histogramme de comparaison des variantes pour les voiles.

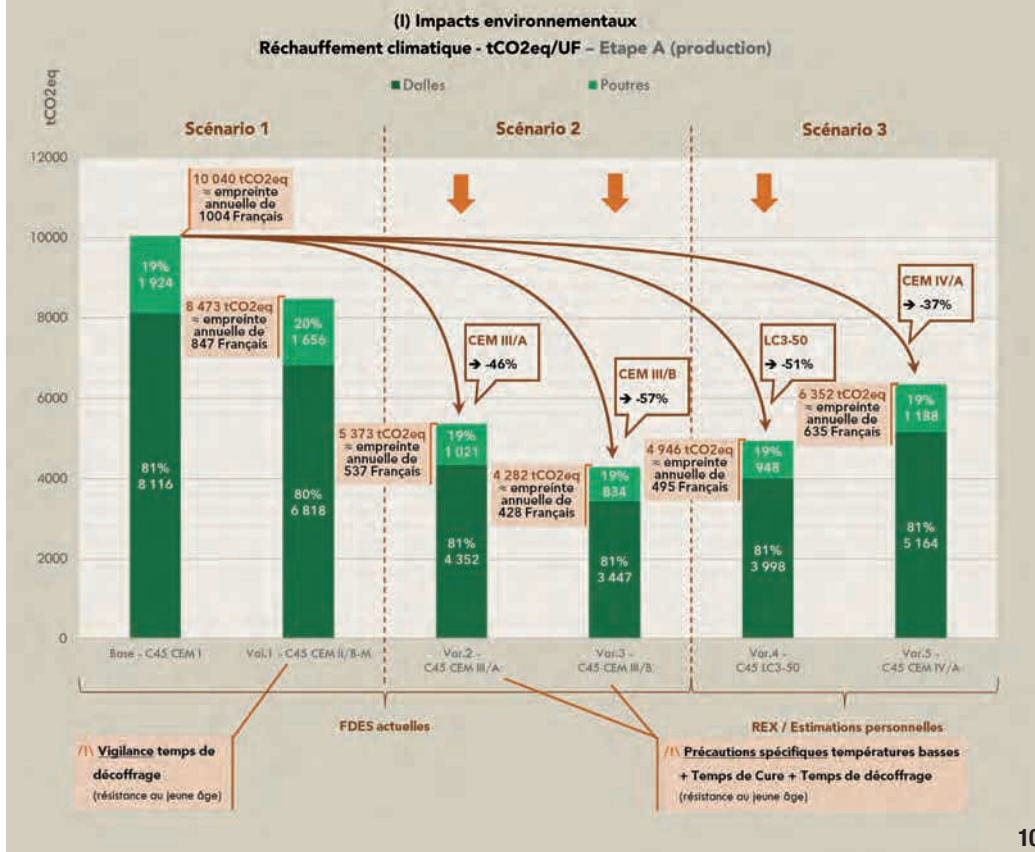
8- Table of characteristics of each variant for the shear walls.

9- Bar chart comparing variants for shear walls.

vérifier les critères de déplacement et d'accélération en tête de tour. Les caractéristiques de chaque variante sont répertoriées dans le tableau de la figure 8.

Comme pour les poteaux, la meilleure variante du scénario 1 correspond à un dimensionnement avec du béton C80 CEM I pour toutes les batteries (figure 9). Toutefois, le poinçonnement du radier reste problématique avec cette solution. Pour le scénario 2, le Dim.4 propose de garder les mêmes épaisseurs que la variante de base, mais en changeant la classe de résistance pour être au plus près des critères limites à vérifier.

HISTOGRAMME DE COMPARAISON DES VARIANTES POUR LES PLANCHERS



La réduction des classes de résistance en partie haute permet d'une part de diminuer l'impact carbone à ciment équivalent (Var.4), mais autorise surtout l'utilisation de ciments "bas carbone" pour ces classes de résistances plus faibles (Var.4bis), et donc une réduction d'impact de 34%. Aussi, la solution en C50 CEM III/A (Var.5) est celle qui présente l'impact le plus faible. Enfin, les estimations d'impact pour les variantes 6 et 7, qui proposent l'utilisation des ciments ternaires

10- Histogramme de comparaison des variantes pour les planchers.

10- Bar chart comparing variants for floors.

de la norme nhEN 197-5, présentent des résultats intéressants mais restent à confirmer par les produits qui sortiront sur le marché.

LES PLANCHERS

Pour les planchers (dalles + poutres), les variantes ne concernent qu'un changement de matériau : les quantitatifs utilisés sont ceux pour un dimensionnement en béton C45, avec un ratio d'acier de 1,3% pour les dalles et de 2% pour les poutres. Les résul-

tats (figure 10) montrent bien que pour une classe de résistance identique, les ciments de haut fourneau sont très intéressants pour réduire l'impact carbone des dalles, avec une réduction de 46% pour le CEM III/A et de 57% pour le CEM III/B, dont le taux de clinker est inférieur à 34% (figure 2). Ces solutions demandent toutefois des précautions spécifiques lors de la mise en œuvre, qui peuvent rallonger le temps de prise et donc le décoffrage. Néanmoins, cela ne devrait pas ralentir la cadence globale du chantier, puisque les horizontaux ne reprennent pas les charges verticales des étages supérieurs.

CONCLUSION

Cette étude sur une tour de grande hauteur montre que les bétons dits "bas carbone" ne sont pas toujours la solution la moins émissive. Pour les éléments dominés par des efforts de compression (notamment les verticaux), il est plus pertinent de rechercher un béton avec une classe de résistance élevée permettant une économie de matière qui compense le poids carbone du matériau. Une piste de développement serait une utilisation de béton "bas carbone" avec des classes de résistance importante.

Cette étude relève le fait qu'il ne s'agit pas seulement de remplacer un matériau par un autre pour faire de la conception "bas carbone". La réduction de carbone ne peut pas se faire uniquement à l'échelle du béton : elle questionne à la fois la conception, la mise en œuvre, et les comportements de prise de résistance qui diffèrent par rapport à un béton "classique". La question de décarboner le béton doit s'accompagner d'une logique de frugalité et d'un retour de principes plus anciens, lorsque la matière coûtait plus cher que la main d'œuvre : construire avec moins, plus efficace et moins émissif. □

ABSTRACT

LOW-CARBON CONCRETES: DESIGN OF A HIGH-RISE BUILDING

KATIA PALHAIS, SETEC TPI - RAFAEL DIAS-SIMÕES, SETEC TPI - INGRID BERTIN, SETEC TPI

Research on "low-carbon" concretes shows the enthusiasm of construction firms for reducing the sector's greenhouse gas emissions. Since clinker is the main factor accounting for the carbon impact of concrete, its partial replacement by other constituents appears an effective way of reducing concrete's GHG emissions. However, the use of a low-carbon concrete is not always the best solution to obtain a "low-carbon" response. Depending on the construction element in question, choosing a high-performance concrete, whose carbon impact per tonne is higher than that of an ordinary concrete, sometimes makes it possible to have a lower overall impact thanks to the material savings achieved. □

LOS HORMIGONES BAJOS EN CARBONO: ESTUDIO DE UN EDIFICIO DE GRAN ALTURA

KATIA PALHAIS, SETEC TPI - RAFAEL DIAS-SIMÕES, SETEC TPI - INGRID BERTIN, SETEC TPI

Las investigaciones en torno a los hormigones «bajos en carbono» revelan la firme voluntad de los actores de la construcción de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del sector. Dado que el clinker es el principal responsable del impacto de carbono del hormigón, su sustitución parcial por otros componentes parece un medio eficaz para atenuar las emisiones del hormigón. No obstante, el uso de un hormigón bajo en carbono no siempre es la mejor solución para lograr una respuesta de iguales características. En función del componente considerado, elegir un hormigón de alto rendimiento, cuyo impacto de carbono por tonelada es superior al de un hormigón corriente, en ocasiones permite obtener un impacto global más bajo fruto del ahorro de material. □



1
© YVES CHANOIT

GRAND PARIS EXPRESS LIGNE 18 LOT 1 - MISE EN PLACE DES PREMIERS VOUSSOIRS EXEGY® ULTRA BAS CARBONE

AUTEUR : VINCENT LESUR, RESPONSABLE TECHNIQUE TUNNEL ET RAMEAU L18 LOT 1, DODIN CAMPENON BERNARD - VINCI CONSTRUCTION

LA LIGNE 18 DU GRAND PARIS EXPRESS RELIE LA GARE AÉROPORT D'ORLY À LA GARE VERSAILLES CHANTIERS. LE LOT 1, QUI S'ÉTEND D'ORLY À PALAISEAU, COMPORTE 12 km DE TUNNEL FORÉ AU TUNNELIER. DANS LE CADRE DE CE PROJET, LES PREMIERS VOUSSOIRS ULTRA BAS CARBONE ONT ÉTÉ DÉVELOPPÉS, TESTÉS, ET MIS EN ŒUVRE DANS LE TUNNEL.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

La Ligne 18 (figure 2) s'étend sur une longueur d'environ 35 km de la gare Aéroport-d'Orly à la gare Versailles-Chantiers. Composée d'une section aérienne entourée de part et d'autre de deux sections en tunnel (figure 1), cette ligne traverse des territoires très contrastés, notamment une zone aéroportuaire (aéroport d'Orly), des secteurs densément urbanisés, des territoires

en développement, des espaces naturels protégés, une zone en proximité des installations du Commissariat de l'énergie atomique et aux énergies alternatives, un site militaire (plateau

1- Tunnel Ligne 18.

1- Line 18 tunnel.

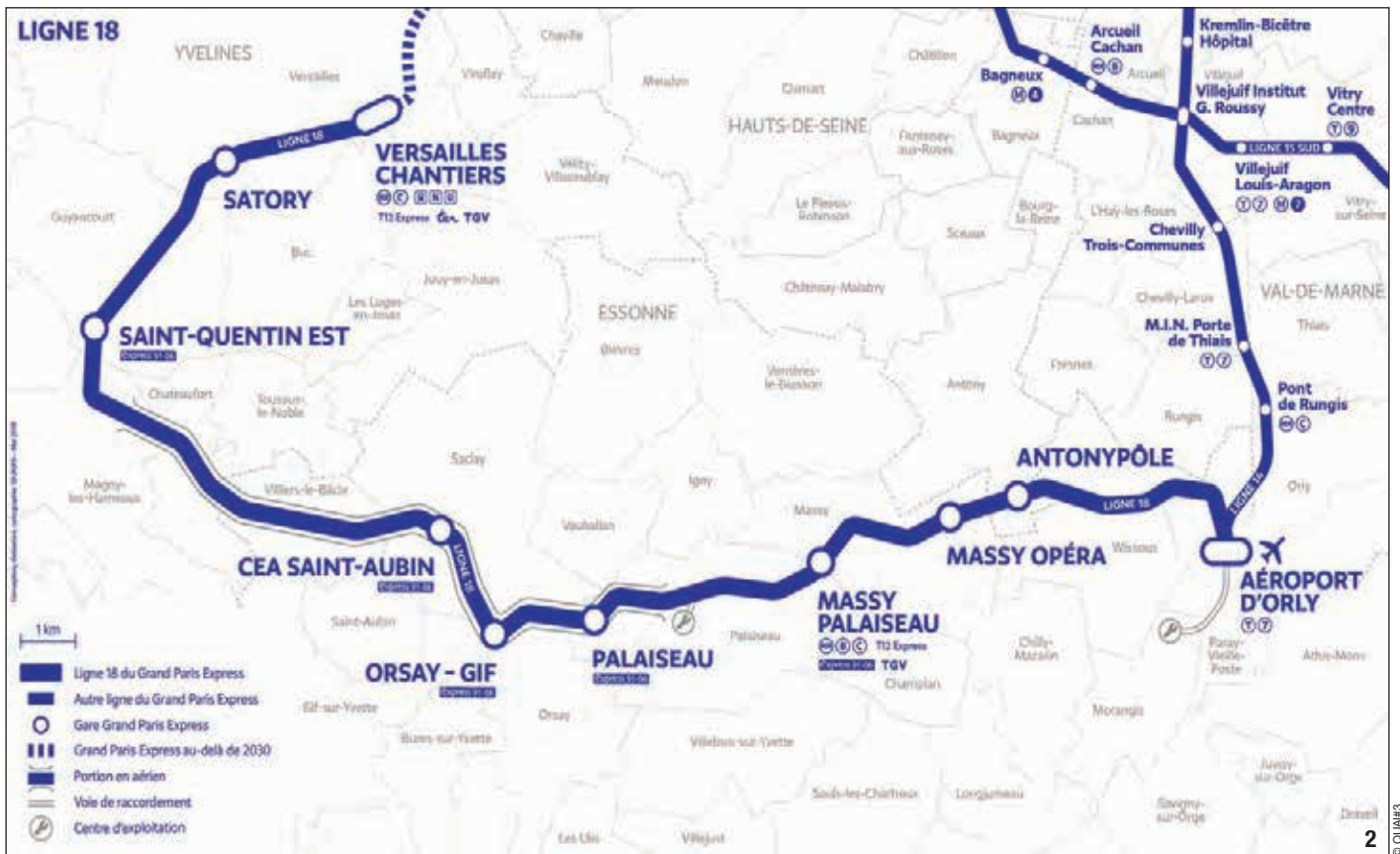
de Satory) et des périmètres de monuments historiques (Versailles).

Le lot 1 s'étend plus précisément de l'ouvrage annexe Pistes d'Orly (OA1) situé dans l'enceinte de l'aéroport d'Orly jusqu'à l'ouvrage Camille Claudel, une tranchée couverte/ouverte située sur la commune de Palaiseau. Il comporte 12 km de tunnel, trois gares, 13 ouvrages annexes et une tranchée couverte/ouverte de 850 m. Le tunnel est excavé avec deux tunne-

liers : le tunnelier à pression de terre Caroline sur le tronçon Massy-Orly et le tunnelier à densité variable puis reconfiguré en pression de terre Céline sur le tronçon Palaiseau-Massy.

UN TUNNEL DE PRESQUE 12 km

Le tunnel présente un diamètre intrados de 8,00 m, avec une épaisseur de voussoirs préfabriqués de 40 cm. Chaque anneau de 2 m de longueur comporte 7 voussoirs. ▷



2

Les voussoirs sont fibrés en zone courante et armés au droit des points singuliers (au droit des rameaux, zones d'entrée/sortie d'ouvrages). Le tunnel est excavé avec 2 tunneliers de diamètre 9,17 m, présentant chacun des caractéristiques différentes. Le tronçon puits Maréchal Leclerc à Massy (OA8) - ouvrage Pistes d'Orly (OA1) d'environ 6 km est réalisé avec une machine à pression de terre (EPB), tandis que le tronçon reliant l'ouvrage Camille Claudel situé à Palaiseau (tran-

chée couverte/ouverte) au puits Maréchal Leclerc (OA8), lui aussi d'environ 6 km, est réalisé avec une machine en densité variable puis reconfigurée en EPB. Les terrains excavés sont principalement composés des marnes d'Argenteuil et de Pantin, des masses et marnes du Gypse, des argiles vertes et du sable de Fontainebleau. Le démarrage du creusement a eu lieu en novembre 2021. La fin est prévue pendant l'automne 2023.

- 2- Carte de la Ligne 18.
- 3- Décoffrage de voussoir test.
- 4- Voussoirs Ultra Bas Carbone.

- 2- Map of Line 18.
- 3- Test segment formwork removal.
- 4- Ultra-Low-Carbon segments.

UNE AMBITION ENVIRONNEMENTALE

Dans le cadre de sa démarche environnementale et avec l'objectif de réduire ses émissions carbone, Vinci Construction a développé des formulations de bétons bas et très bas carbone, proposés sous la gamme EXEGY® en substituant le clinker du ciment par des coproduits comme les cendres volantes ou les laitiers de hauts-fourneaux. Avant d'être bas carbone, ces bétons étaient utilisés pour leurs performances



3



4



5
© EXEGY®



6
© EXEGY®

techniques et notamment en génie civil pour leur faible chaleur d'hydratation. En s'engageant à atteindre 90% de béton bas carbone en 2030, Vinci entend donc généraliser l'usage de ces bétons décarbonés, quel que soit l'usage, en cherchant à réduire toujours

plus la part de clinker dans les bétons. Sur le projet du lot 1 de la Ligne 18 du Grand Paris Express, il a ainsi été proposé d'accompagner la démarche d'innovation environnementale de la Société du Grand Paris en développant et en mettant en œuvre les premiers

voussoirs EXEGY® Ultra Bas Carbone. Jusqu'à présent, sur ce projet les voussoirs utilisés répondaient au standard technique EXEGY® Très Bas Carbone avec un taux de substitution au clinker proche de 60%. Avec la solution EXEGY® Ultra Bas Carbone, le ciment

est intégralement remplacé par le liant alcali-activé Ecocem Ultra, ce qui permet d'éviter environ une tonne de CO₂ par mètre de tunnel, soit une réduction supérieure à 50% par rapport aux bétons couramment utilisés dans les voussoirs de tunnel. ▷

- 5- Voussoirs à l'usine.
- 6- Voussoirs Ultra Bas Carbone en stockage.
- 7- Essai feu au Cerib.
- 8 & 9- Essai mécanique.

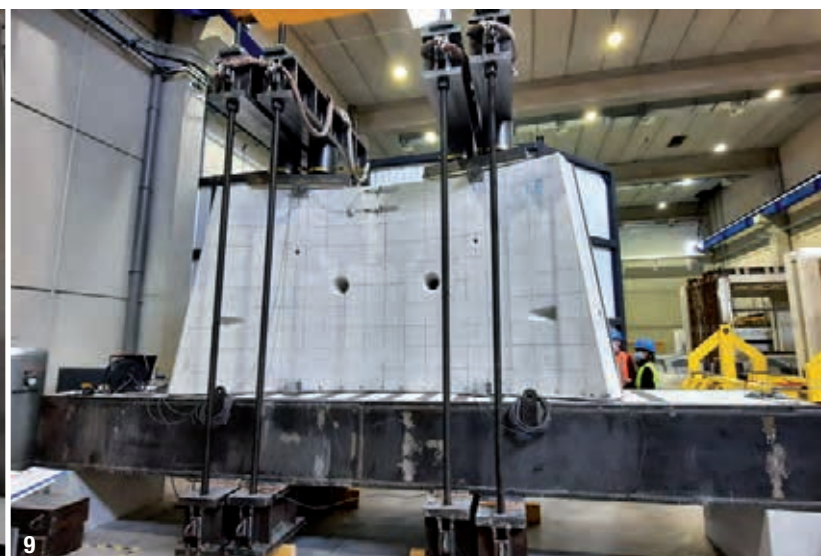
- 5- Segments in factory.
- 6- Ultra-Low-Carbon segments in storage.
- 7- Fire test at the Cerib.
- 8 & 9- Mechanical test.



© VINCI CONSTRUCTION
7



8
© VINCI CONSTRUCTION



9
© VINCI CONSTRUCTION

UNE DÉMARCHE PARTAGÉE

La démarche, initiée par Vinci Construction début 2021, a fait l'objet d'un partenariat fort entre la Société du Grand Paris et le groupement constructeur. Les acteurs suivants ont également été pleinement associés : le laboratoire matériau de Vinci Construction (formulations et conformité techniques des bétons EXEGY® Bas Carbone et Ultra Bas Carbone), la Tunnel Factory (pôle d'innovation Tunnel de Vinci Construction), Ecocem (fournisseur du liant), Cdb (usine de préfabrication) et Stradal, qui a la charge de la préfabrication des voussoirs pour le projet.

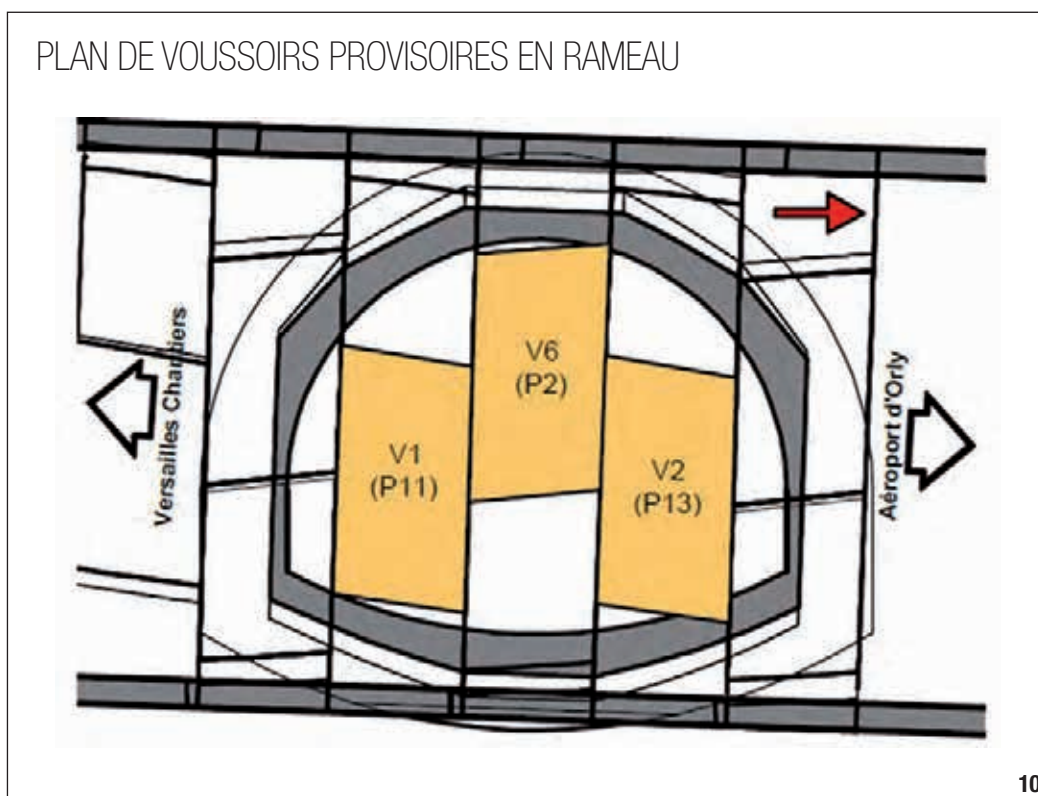
DE LA RECHERCHE À LA RÉALISATION

La mise au point de ces voussoirs a fait l'objet d'études et d'essais pendant plusieurs mois.

Du fait de leur préfabrication en usine avec un cycle de production élevé, les bétons des voussoirs doivent répondre à des caractéristiques très précises (mise en place dans les moules, vibration, talochage, décoffrage, étuvage, transport...). Il a fallu ainsi adapter et mettre au point une formulation spécifique Ultra Bas Carbone permettant de répondre à ces exigences.

Ce processus a été réalisé en plusieurs étapes :

- 1^{re} série d'essais chez Cdb pour mettre au point la formule (figures 3 et 4) ;
- 2^e série d'essais chez Stradal avec coulage de voussoirs à l'échelle 1 dans des moules (figures 5 et 6), suivi des convenances du béton ;



10

© VINCI CONSTRUCTION

→ 3^e série d'essais mécaniques au Cerib (essai au feu, essai pression localisée et essai flexion 3 points, figures 7, 8 et 9).

En octobre 2021, l'obtention de l'Évaluation Technique Européenne (ETE) du liant Ecocem Ultra rend son usage dans les bétons EXEGY® Ultra Bas Carbone conforme à la norme EN 206-1/CN. Cette ETE et les essais de durabilité et de performances mécaniques réalisés en parallèle étaient un préalable à la

10- Plan de voussoirs provisoires en rameau.

11 à 13- Voussoir Ultra Bas Carbone en tunnel.

10- Drawing of temporary segments in connecting gallery.

11 to 13- Ultra-Low-Carbon segment in tunnel.

fabrication des voussoirs EXEGY® Ultra Bas Carbone et leur mise en œuvre dans le tunnel de la Ligne 18.

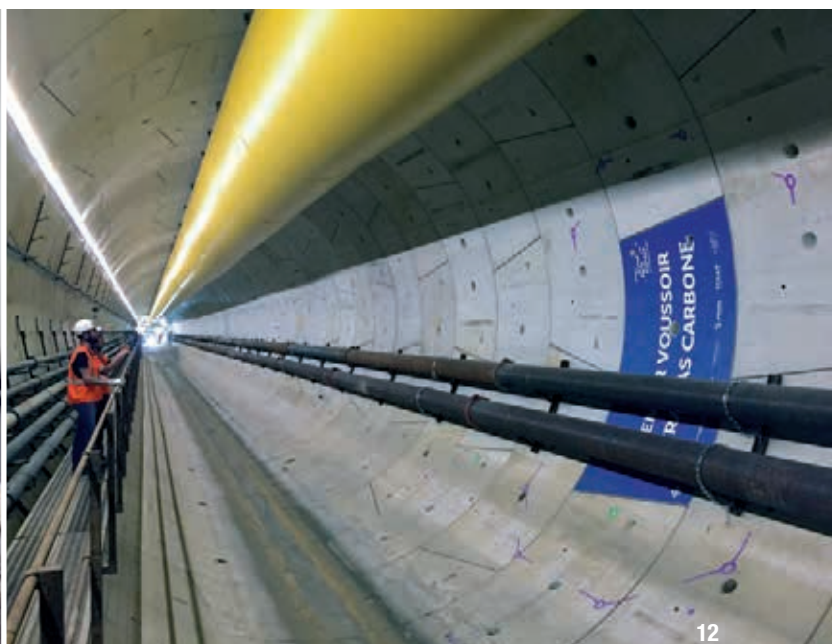
CARACTÉRISTIQUES DES VOUSSOIRS

À l'exception de leur couleur plus claire et de la très faible empreinte carbone, rien ne distingue les voussoirs EXEGY® Ultra Bas Carbone des voussoirs traditionnels. La géométrie des voussoirs est strictement identique aux voussoirs



11

© VINCI CONSTRUCTION



12

© VINCI CONSTRUCTION



© YVES CHANOT

13

classiques et leurs caractéristiques mécaniques sont à minima équivalentes. Leur mise en place sur chantier n'engendre aucune disposition particulière dans la chaîne de mise en place du transport jusqu'au site puis jusqu'à la mise en place par le tunnelier.

UNE PREMIÈRE MONDIALE POUR LA MISE EN ŒUVRE SUR LE LOT 18.1

Il a été conjointement décidé avec la Société du Grand Paris de procéder à une mise en œuvre en deux étapes :

- Une première étape qui consiste à positionner huit voussoirs (armés) dans les futures zones d'ouverture de quatre rameaux, les tunnels de service qui relient les puits au tunnel principal (figure 10). Ces voussoirs sont donc provisoires et seront démolis. Le premier voussoir ultra bas carbone a été posé le 29 avril 2022 au droit du rameau 14 (figures 11, 12 et 13).
- Une deuxième étape qui consiste à positionner trois anneaux complets, soit 21 voussoirs, dans l'extrémité du tronçon côté Orly. Ces anneaux seront définitifs et feront l'objet d'un suivi spécifique durant la vie de l'ouvrage (en particulier leur géométrie, leur fissuration et la carbonatation du béton). Il s'agit d'une première mondiale ! □

CHIFFRES CLÉS

MONTANT DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL :
800 M€

DURÉE GLOBALE D'EXÉCUTION : 81 mois

TUNNEL : 11 800 m

GARES : 3 gares souterraines

OUVRAGES ANNEXES : 13 ouvrages dont 3 puits centrés

TRANCHÉE : 1 tranchée couverte/ouverte de 850 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Société du Grand Paris

MAÎTRE D'ŒUVRE : groupement Icare composé de Ingérop (mandataire), Artélia, Arcadis, Dfa-Richez Associés, Ateliers 2/3/4, C Vezzoni et Associés, JF Schmit Architectes

GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Vinci Construction Grands Projets / Spie Batignolles Génie Civil / Dodin Campenon Bernard / Vinci Construction France / Spie Batignolles Fondations / Vinci Construction Terrassement / Valérian - Spie Batignolles

ABSTRACT

GRAND PARIS EXPRESS LINE 18 WORK SECTION 1 - INSTALLING THE FIRST EXEGY® ULTRA-LOW-CARBON SEGMENTS

VINCENT LESUR, DODIN CAMPENON BERNARD - VINCI CONSTRUCTION

Line 18 of the 'Grand Paris Express' metro project links Aéroport-d'Orly Station to Versailles Chantiers Station. Work section 1 consists of a tunnel 11,800 metres long and of inner diameter 8.00 m. Its lining is formed of precast concrete segments. For the first time, Vinci has developed and employed segments in EXEGY® Ultra-Low-Carbon concrete. Extensive design work and testing was performed for development of the concrete formation and manufacture of these segments. □

GRAND PARIS EXPRESS, LÍNEA 18 LOTE 1 - INSTALACIÓN DE LAS PRIMERAS DOVELAS EXEGY® ULTRABAJAS EN CARBONO

VINCENT LESUR, DODIN CAMPENON BERNARD - VINCI CONSTRUCTION

La Línea 18 del Grand Paris Express une la estación de Aéroport d'Orly con la de Versailles Chantiers. El lote 1 incluye un túnel de 11 800 m, con un diámetro interior de 8,00 m. Su revestimiento está compuesto de dovelas de hormigón prefabricado. Vinci ha desarrollado e instalado por primera vez dovelas de hormigón EXEGY® ultrabajo en carbono. El desarrollo de la formación del hormigón y de la fabricación de las dovelas ha sido objeto de estudios y ensayos exhaustivos. □



1

© CÉDRIC HELSLY

DÉVELOPPEMENT, ESSAIS ET MISE EN ŒUVRE DE BÉTON ULTRA BAS CARBONE LORS DE LA RÉALISATION DE LA PAROI MOULÉE DE PORT 2000 (PHASE 3) AU HAVRE

AUTEURS : JUSTINO CHRISTOPHE, RESPONSABLE LABORATOIRE MATÉRIAUX, SOLETANCHE BACHY - HOLDER THOMAS, INGÉNIEUR MATÉRIAUX, SOLETANCHE BACHY - GALY STÉPHANE, DIRECTEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE

SOLETANCHE BACHY COULE SA PREMIÈRE BARRETTE EN BÉTON DE FONDATION ULTRA BAS CARBONE SUR LE CHANTIER DU PORT DU HAVRE, TERRE PROPICE AUX INNOVATIONS. APRÈS AVOIR RÉALISÉ UNE SECTION DU QUAI EN BÉTON AVEC UN LIANT CEM III/C, LES ÉQUIPES CHANTIER ET LE DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ONT MENÉ LE PREMIER PLOT D'ESSAI À BASE DE BÉTON DE FONDATION EXEGY (LIANT ALCALI-ACTIVÉ), ABOUTISSEMENT DE LA RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT SUR LES SOLUTIONS BAS CARBONE. CE BÉTON INNOVANT A ÉTÉ VALIDÉ PAR UN SUIVI DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ, MAIS ÉGALEMENT PAR UNE ATTENTION PARTICULIÈRE À LA LOGISTIQUE DE PRODUCTION ET DE MISE EN ŒUVRE DU BÉTON.

Depuis le début des années 2000, Haropa Port - Le Havre réalise successivement des postes à quai de 350 m dans Port 2000, dans le but de doubler son trafic de conteneurs à moyen terme. Ces postes à quai et leurs terre-pleins permettent de recevoir de plus grands porte-conteneurs sans dépendre du niveau de marée ni de passage d'écluses.

Soletanche Bachy, qui a déjà réalisé les 10 premiers postes à quai lors des deux premières phases, réalise depuis début 2020 la phase 3 de ce projet, avec la création des deux derniers postes sur un linéaire utile de 700 m (et 111 m de quai en retour).

Le quai est réalisé en paroi moulée, pour laquelle Soletanche Bachy a mis en place des bétons très bas et ultra bas carbone.

1- Vue aérienne du chantier de la phase 3 de Port 2000.

1- Aerial view of the construction site for Port 2000 phase 3.

HISTORIQUE DU PROJET

L'entreprise Soletanche Bachy est impliquée dans chacune des 3 phases de construction de Port 2000 :

- Phase 1 (2001-2005) : réalisation de 4 postes à quai, 70 000 m³ de béton de paroi moulée ;
- Phase 2 (2007-2010) : réalisation de 6 postes à quai (n°5 à 10), 125 600 m³ de béton de paroi moulée ;



© CÉDRIC HELSLY

2

→ Phase 3 (2020-2022) : construction des 2 derniers postes à quai n°11 & 12, 36 750 m³ de béton de paroi moulée (figure 1).

DESCRIPTIF DES TRAVAUX ET CONCEPTION

Dans le cadre de la phase 3 de Port 2000, Soletanche Bachy intervient en tant que mandataire d'un groupement comprenant notamment Bouygues TP RF pour la réalisation du génie civil et Atlantique Dragages (groupe Boskalis) pour les opérations de dragage. La maîtrise d'œuvre est assurée par Haropa Port - Le Havre en conception et en exécution.

Les travaux consistent en la création d'un quai en paroi moulée de 1,5 m d'épaisseur et 40 m de profondeur, coiffé d'une poutre de couronnement arasée à (+10,20) CMH (Cote Marine Havraise), qui vient liaisonner les panneaux de paroi moulée et reçoit le rail avant des portiques de manutention des conteneurs (figures 2 et 3).

L'ouvrage est retenu par 2 lits de tirants passifs situés au niveau de la paroi à la cote (-8,00) CMH et (+3,00) CMH. Afin de mettre en place l'ensemble tirants-palplanches et de réaliser le masque d'accostage, des terrassements à l'avant sur 10 m de hauteur environ et à l'arrière de la paroi moulée sur 18 m de hauteur environ sont nécessaires. Afin de pouvoir mener ces terrassements à sec, une paroi au coulis périphérique est réalisée autour du quai. Une fois les travaux de quai achevés, il est procédé, après retrait des dispositifs provisoires d'étanchéité et de la digue d'enclosure permettant de s'isoler du bassin en phases travaux, aux travaux de déblais par moyens terrestres

2- Vue aérienne du chantier en phase travaux.

3- Vue aérienne de la paroi moulée du quai en phase terrassement.

2- Aerial view of the site in the works phase.

3- Aerial view of the quay diaphragm wall in the earth-works phase.

et par dragage pour atteindre la cote d'exploitation prévue à (-17,20) CMH. Le marché prévoit également la mise en place d'une protection anti-affouillement le long du quai sur une largeur de 40 m.



3

© CÉDRIC HELSLY

Un précédent article publié dans la revue Travaux décrit les travaux du chantier dans son ensemble.

CONTEXTE

Depuis début 2020 les équipes de spécialistes ont d'abord pu déployer le savoir-faire de Soletanche Bachy pour la réalisation de la paroi moulée du quai et de son enceinte étanche en paroi coulis. Ces deux activités ont été complétées par une multitude de travaux géotechniques annexes. Ce chantier a été aussi l'occasion de mettre en œuvre des bétons ultra bas carbone avec Exegy by Soletanche Bachy, dont une barrette d'essai en laitier activé. Une première pour la profession !

SOLUTIONS BÉTONS BAS CARBONE

La collaboration entre les équipes commerciales, le laboratoire des maté-

riaux et les équipes travaux a permis d'appliquer la démarche Exegy by Soletanche Bachy à ce chantier pour le développement de solutions optimisées en termes d'empreinte carbone des formules de béton de paroi moulée. Avec Exegy, Soletanche Bachy, en ligne avec la démarche initiée par le groupe Vinci Construction, propose une matrice de qualification de la performance de réduction des émissions de CO₂ et une définition de critères d'émission à atteindre (figure 4).

Le béton utilisé pour la phase II de Port 2000, réalisée entre 2007 et 2010, avait déjà la particularité d'être classé très bas carbone (163 kg CO₂eq/m³⁽¹⁾). Pour cette phase III, ce sont 35 500 m³ de béton très bas carbone (147 kg CO₂eq/m³⁽¹⁾) et 1 000 m³ de béton ultra bas carbone (95 kg CO₂eq/m³⁽¹⁾) conformes à la norme NF EN 206/CN qui sont mis en œuvre (figures 5 et 6).

Sur ce projet, il a également été proposé une solution innovante en laitier activé développé conjointement avec le laboratoire béton de Vinci Construction France et la société Ecocem. Cette solution n'étant pas conforme à la norme et les agréments techniques en cours de validation n'étant pas encore disponibles, il a été décidé de réaliser un démonstrateur pour prouver la faisabilité de réalisation d'un béton de fondation profonde à base de laitier activé. L'objectif est une résistance caractéristique de 35 MPa et un maintien d'ouvrabilité de 4 heures, ayant permis le coulage en 2 heures d'une barrette de 50 m³ à 17 m de profondeur. Cet élément fait l'objet d'une investigation in situ complémentaire pour déterminer les indicateurs de durabilité de ce béton. ▷

4- Matrice Exegy définissant les seuils d'émissions de CO₂eq/m³ de béton (aciers non compris) en fonction de la classe de résistance à la compression.

5- Paroi moulée excavée montrant la transition entre le béton de paroi utilisant un ciment de type CEM III/B et le béton de paroi utilisant un ciment CEM III/C.

6- Émission kg CO₂/m³ (axe à droite) - Teneur en liant+additions (axe gauche) - source FDES Athil / Société Ecocem et Omya 2021.

4- Exegy matrix chart defining the CO₂eq/m³ emission thresholds of concrete (not including rebars) as a function of the compressive strength class.

5- Excavated diaphragm wall showing the transition between the wall concrete using a CEM III/B type cement and wall concrete using a CEM III/C cement.

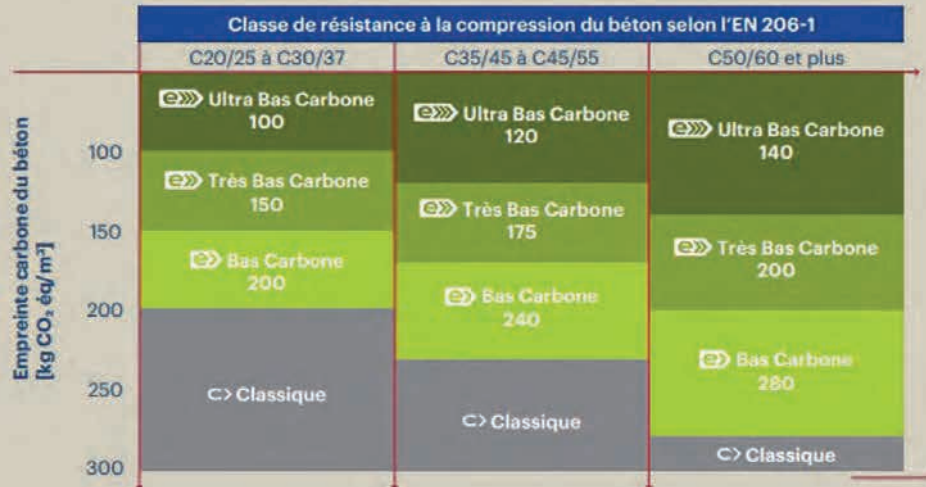
6- Emissions in kg of CO₂/m³ (RH axis) - Binder+additions content (LH axis) - Source: FDES Athil / Société Ecocem and Omya 2021.

Ce type de formulation s'inscrit dans les évolutions normatives que la profession souhaite voir arriver dans les prochaines années.

VALIDATION DU LIANT ALCALI-ACTIVÉ POUR LES FONDATIONS PROFONDES

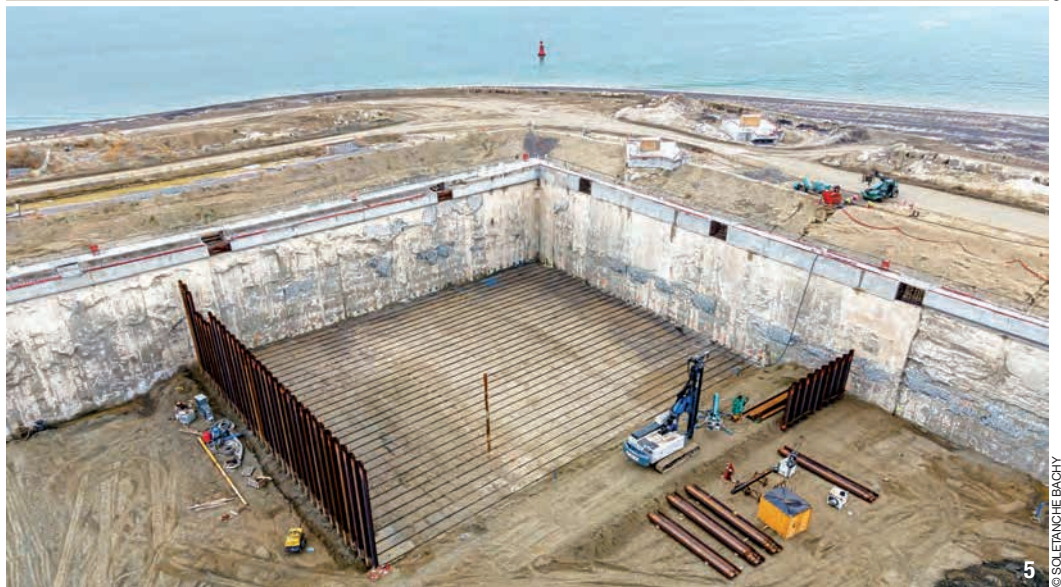
Le 9 mars 2021, les équipes du port du Havre construisaient une barrette en béton Exegy by Soletanche Bachy ultra bas carbone à 17 m de profondeur composé d'un liant contenant exclusivement du laitier de haut fourneau activé (un béton présentant une empreinte carbone de réduite à

MATRICE EXEGY DÉFINISSANT LES SEUILS D'ÉMISSIONS DE CO₂eq/m³ DE BÉTON (ACIERS NON COMPRIS) EN FONCTION DE LA CLASSE DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION



4

© SOLETANCHE BACHY



5

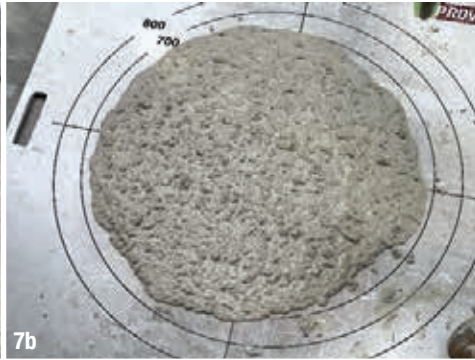
© SOLETANCHE BACHY

ÉMISSION kg CO₂/m³ (axe à droite) - TENEUR EN LIANT+ADDITIONS (axe gauche) (source FDES Athil / Société Ecocem et Omya 2021)

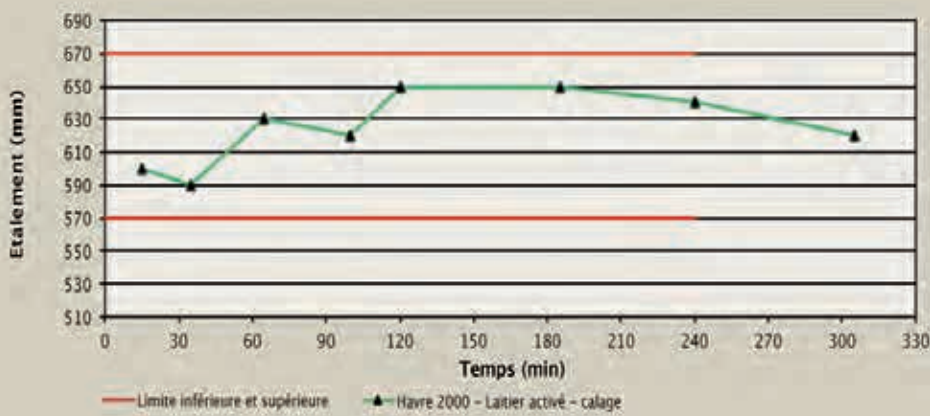


6

© FDES ATHIL / SOCIÉTÉ ECOCEM ET OMYA



SUIVI DU MAINTIEN D'OUVRABILITÉ DU BÉTON AU COURS DU TEMPS



© SOLETANCHE BACHY

8

71 kg CO₂eq/m³). Cette formulation spécifique réalisée pour ce chantier, est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire de Vinci Construction et le département matériaux de Soletanche Bachy associé à la société Ecocem. Sa mise en œuvre a été favorisée par l'ouverture et la collaboration du partenaire local Béton Solutions Mobiles. Bien que la mise en œuvre de ce béton innovant ne soit pas intégrée à l'ouvrage définitif, la démarche adoptée par le laboratoire matériaux de Soletanche Bachy a été similaire à celle retenue pour la validation des bétons des ouvrages définitifs.

Le plot d'essai a permis de valider :

7- Étalement à la table à choc réalisé lors des essais de convalidations.

8- Suivi du maintien d'ouvrabilité du béton au cours du temps.

7- Flow table test performed during suitability tests.

8- Monitoring of the continuing workability of concrete over time.

→ Le respect technique du cahier des charges interne des bétons de fondations profondes reprenant de nombreuses recommandations du "Guide du béton de fondation profonde mis en œuvre au tube plongeur" par le groupe de travail béton conjoint Effic/Dfi seconde édition en date de 2018 et sa version française de décembre 2021 ;

→ Un maintien d'ouvrabilité du béton maintenu pendant 4h et une option de formulation pour un prolongement à 6h, dans la perspective de déploiement de la solution à des éléments plus profonds et plus volumineux ;

- La validation de la robustesse de la formule au travers d'une étude en laboratoire ;
- Le respect des performances mécaniques visées, à savoir un C35/45 conforme à la classe XS2 du projet ;
- La répétabilité des performances en unité de production ;
- La validation de la mise en œuvre sans impact sur la cadence de coulage au tube plongeur sous fluide de forage ;
- L'intégrité de l'élément réalisé et sa performance mécanique in situ ;
- La vérification de la durabilité au moyen d'indicateurs de durabilité recommandés par le récent FD P18-480.

Les liants alcali-activés n'étant pas conformes à la norme béton actuelle, il était important d'investiguer les indicateurs de durabilité du béton formulé avec ce liant innovant Ecocem Ultra. Ce dernier a la particularité d'être couvert, pour les essais de durabilité, par une évaluation technique européenne du 10 septembre 2021 délivrée par le Cerema (ETE-21/0746) pour les classes d'exposition XC et XS rencontrées sur le projet. Les étapes de validation de la formulation de béton ont été les suivantes :

→ Une phase d'étude en laboratoire permettant le calage de la formule de béton avec le liant Ecocem ultra, les adjuvants sélectionnés pour prolonger le maintien d'ouvrabilité du béton, qui est une propriété indispensable pour la mise en œuvre au tube plongeur sous fluide de forage et les granulats du partenaire local fournissant le béton ;

→ Une seconde phase d'étude en laboratoire avec contrôle de la formule nominale et des dérivées en eau et en liants afin de valider la performance mécanique du béton présentant une résistance à la compression moyenne à 28 jours de 45,2 MPa et le respect des propriétés à l'état frais que sont la consistance initiale, de temps d'écoulement et son maintien, la stabilité évaluée par un essai de ressuage statique et un essai de ressuage forcé sous pression ;

→ La réalisation d'essais de convalidation préalable au coulage de la barrette, afin de valider la production de ce béton en unité de production (figures 7 et 8). La résistance à la compression moyenne à 28 jours permet de valider un béton de classe C30/37. L'évolution significative de la résistance à la compression à 56j permet de valider une classe C40/50 ;

TABLEAU A : RÉSULTATS DES ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE SUR LE BÉTON MIS EN ŒUVRE (correction prise en compte pour les éprouvettes 11 x 22 cm)

Résistance à la compression, MPa	Confection centrale			Confection chantier
<i>BL</i>	3514	3516	3519	3516
<i>Type éprouvettes</i>	11x22 cm	11x22 cm	11x22 cm	16 x 32 cm
<i>Nb éprouvettes confectionnées</i>	12	18	12	9
7 jours	21,3	20	20,5	17,4
14 jours	30,6	27,8	28,6	28,2
28 jours	37,4	37,9	39,1	40,8
56 jours	42,8	46,9	54,1	-
91 jours	52,8	50,8	57,8	44,6

© SOLETANCHE BACHY

9- Implantation des carottages verticaux.

10- Implantation des carottages horizontaux.

11- Vue de la zone dégagée de la barrette lors des opérations de carottage.

9- Vertical core sampling layout.

10- Horizontal core sampling layout.

11- View of the uncovered area of the barrette during core sampling operations.

→ Durant le coulage, toutes les toupies ont été contrôlées en consistance et 4 lots de 12 éprouvettes ont été confectionnées pour réalisation des essais de résistance à la compression (tableau A) et de durabilité.

PRÉSENTATION DE L'ÉLÉMENT RÉALISÉ

Le panneau PR16 est un panneau réalisé dans le prolongement du tronçon n°5 du quai retour :

- Épaisseur : 1,02 m ;
- Longueur : 2,80 m ;
- Profondeur : 17,0 m ;
- Arase béton théorique : -0,7 m.

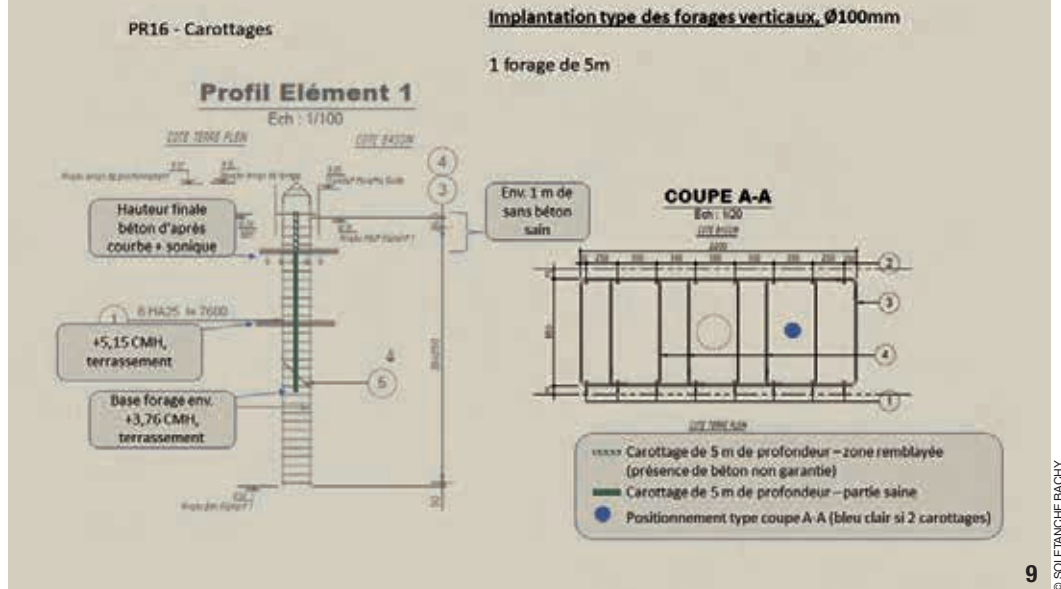
La réalisation de l'élément a été conforme aux méthodes d'exécution. La cadence de mise en œuvre n'a pas été impactée par la formulation et le comportement en écoulement du béton qui a été suivi pendant toute la phase de coulage.

Le contrôle de la courbe de bétonnage avec suivi du remplissage correct de l'élément à couler permet de s'assurer de la bonne mise en œuvre du béton. Un contrôle par auscultation sonique à 14j a permis de confirmer l'intégrité physique du béton en place, permettant ainsi de rassurer les équipes chantier sur la compatibilité de ce béton optimisé d'un point de vue empreinte environnementale avec l'application aux ouvrages géotechniques.

Un plan d'inspection a été mis en place afin de valider les performances mécaniques et certains indicateurs de durabilité pertinents pour le contexte de l'ouvrage (figures 9, 10 et 11).

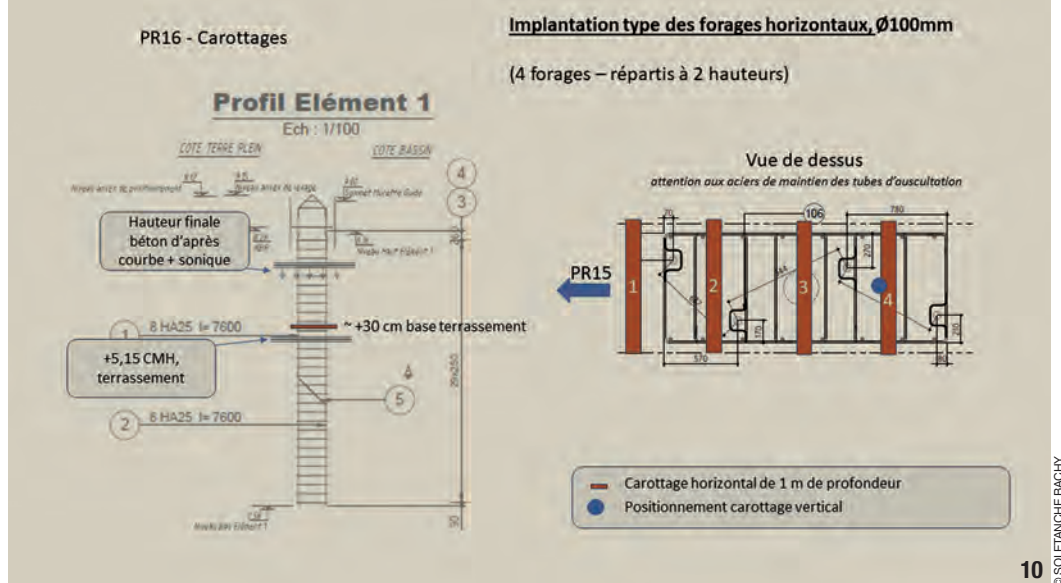
Les essais réalisés sur les éprouvettes extraites du carottage vertical permet-

IMPLANTATION DES CAROTTAGES VERTICAUX

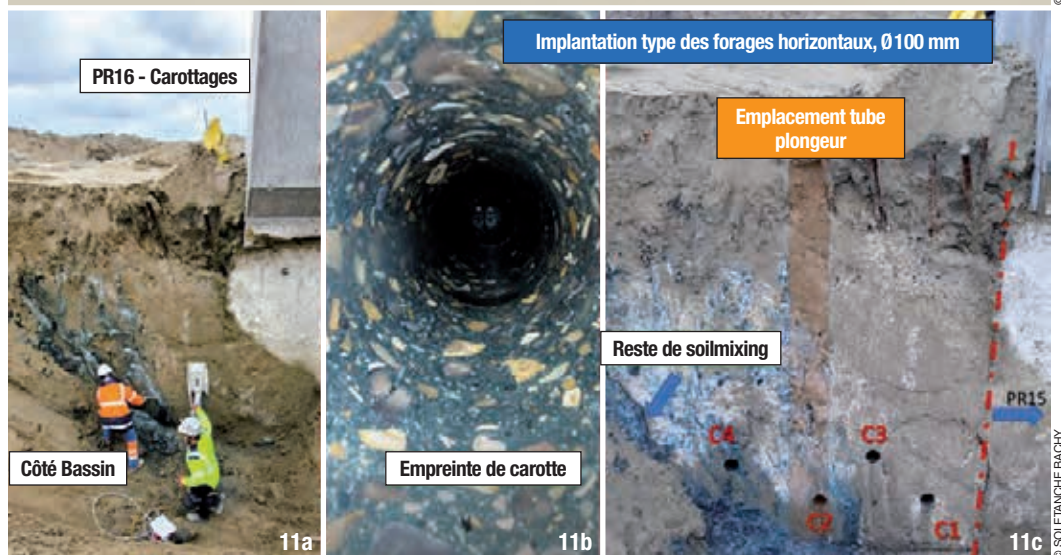


9 © SOLETANCHE BACHY

IMPLANTATION DES CAROTTAGES HORIZONTAUX



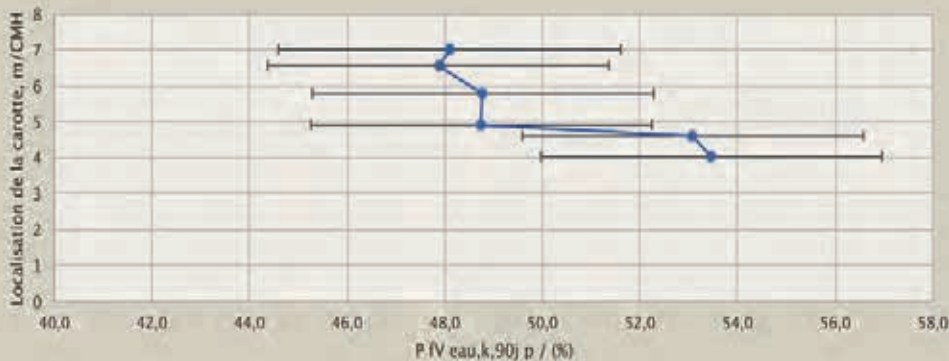
10 © SOLETANCHE BACHY



11a 11b 11c © SOLETANCHE BACHY

RÉSULTATS DES ESSAIS DE POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU RAPPORTÉS À LA FRACTION VOLUMIQUE DE PÂTE DU BÉTON

Porosité caractéristique accessible à l'eau (selon NF P 18-459) / Fraction volumique de pâte P eau,k,90j / Fvp (%)



12

tent d'évaluer la résistance caractéristique in situ de 35 MPa conforme à la classe XS2 du projet et des valeurs de porosité à l'eau rapportée au volume de la pâte comprise entre 48% et 54% conforme à une durée de vie de projet de 100 ans en classe XC2 généralement retenue pour les ouvrages de fondation et un seuil de 65%, d'après les recommandations du fascicule FD P18-480 (figure 12).

Les essais réalisés sur les éprouvettes extraites des carottages horizontaux ont permis d'évaluer la résistivité électrique du béton à cœur avec des valeurs très supérieures à 175 Ω m ainsi que le coefficient de migration des chlorures variant de 0,7 à $1,2 \times 10^{-12}$ m²/s proche des valeurs mesurées sur éprouvettes confectionnées le jour du coulage et inférieur au seuil de performance de $3,5 \times 10^{-12}$ m²/s donné par le fascicule 65 dans le paragraphe dédié à l'approche performantielle. Les résis-

12- Résultats des essais de porosité accessible à l'eau rapportés à la fraction volumique de pâte du béton.

12- Test results for porosity accessible to water relative to the volume fraction of concrete paste.

tances à la compression mesurées sur les éprouvettes issues des carottages horizontaux après correction permettent d'évaluer une résistance moyenne autour de 48 MPa compatible avec une résistance caractéristique de 55 MPa suivant l'application de la norme NF EN 13791. Ces essais ont été réalisés à environ 300 jours.

Bien que la formulation du béton de cette barrette d'essai emploie un liant non normalisé qui n'entre pas dans le champ d'application du fascicule de

documentation FD P18-480, il était fondamental de pouvoir évaluer ce béton et ce liant vis-à-vis de ces critères de performances récemment établis par l'industrie.

UN PARI RÉUSSI !

Ce n'est pas la première fois que le Grand Port Maritime du Havre fait confiance aux équipes de Soletanche Bachy pour réduire l'empreinte carbone de ses ouvrages. D'autres essais ont pu être menés par le passé. Cela reste néanmoins une première pour le groupe mais également une première à l'échelle du groupe Vinci et du monde de la construction.

Ce plot d'essai est un nouvel exemple de l'ambition de Soletanche Bachy vers l'emploi de matériaux à plus faible empreinte carbone. L'entreprise a développé une expertise matériaux qui permet d'assurer un déploiement optimisé des approches béton bas carbone que ce soit en France ou à l'étranger. Ces résultats sont prometteurs et donnent un signal favorable à la poursuite du développement de solutions en béton bas carbone avec une réduction la plus optimisée possible de la quantité de ciment Portland. D'autres solutions permettant de recourir à des fractions plus réduites de laitiers de haut fourneau et favorisant d'autres additions minérales sont également en cours de développement. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Haropa Port - Le Havre

MAÎTRE D'ŒUVRE : Haropa Port - Le Havre - Direction de la maîtrise d'œuvre et de l'ingénierie

ENTREPRISES : groupement Soletanche Bachy France (mandataire), Atlantique Dragage, Bouygues Travaux Publics Régions France

1- La valeur d'émission de CO₂ est présentée telle que calculée à l'époque de la réalisation de l'ouvrage avec une FDES du laitier à 17 kg CO₂eq/T. Les auteurs reconnaissent que le laitier granulé est actuellement à 100 kg CO₂eq/T ce qui remonte les valeurs présentées mais ne change pas la qualification ultra bas carbone des solutions mises en place.

ABSTRACT

DEVELOPMENT, TESTING AND PLACING OF ULTRA-LOW-CARBON CONCRETE FOR EXECUTION OF THE DIAPHRAGM WALL OF PORT 2000 (PHASE 3) AT LE HAVRE

JUSTINO CHRISTOPHE, SOLETANCHE BACHY - HOLDER THOMAS, SOLETANCHE BACHY - GALY STÉPHANE, SOLETANCHE BACHY FRANCE

Since January 2020, Soletanche Bachy France has been performing construction of berths 11 & 12 for Haropa Port - Le Havre. These two berths are an extension of the 3,500-metre length of the first ten berths, constructed by Soletanche Bachy during the first two phases of Port 2000 in the 2000s. In partnership with its client, special attention was paid to the concrete mix design for the diaphragm walls of the structure, with the proposal of an optimised mix for construction of the side quay and execution of a test barrette in ultra-low-carbon concrete with a non-standardised activated alkali slag binder. For this project a major research programme was carried out on the mechanical and durability performance of this innovative concrete. □

DESARROLLO, ENSAYOS Y APLICACIÓN DEL HORMIGÓN ULTRABAJO EN CARBONO DURANTE LA REALIZACIÓN DE LA PANTALLA DE HORMIGÓN DE PORT 2000 (FASE 3), EN EL HAVRE

JUSTINO CHRISTOPHE, SOLETANCHE BACHY - HOLDER THOMAS, SOLETANCHE BACHY - GALY STÉPHANE, SOLETANCHE BACHY FRANCE

Desde enero de 2020, Soletanche Bachy France está construyendo los puestos de atraque 11 y 12 para Haropa Port - Le Havre. Estos dos puestos se han agregado a los 3500 m de los diez primeros puestos de atraque, realizados por Soletanche Bachy durante las dos primeras fases de Port 2000, durante los años 2000. En la línea habitual de su colaboración con el cliente, se ha prestado especial atención a la formulación de los hormigones de las pantallas de la obra, con una propuesta de fórmula optimizada para la realización del muelle de cierre y una barra de ensayo de hormigón ultrabajo en carbono con un ligante no normalizado a base de escoria alcali activada. Esta realización ha permitido desplegar un importante programa de estudio de rendimiento mecánico y durabilidad de este innovador hormigón. □



1
© EIFFAGE

VIADUC DE MILLAU - DÉMARCHE DURABILITÉ POUR GARANTIR UNE DURÉE D'UTILISATION DU PROJET DE 120 ANS

AUTEURS : THIERRY VAYSSADE, RESPONSABLE SÉCURITÉ, TRAFIC ET PATRIMOINE, COMPAGNIE EIFFAGE DU VIADUC DE MILLAU - ABDELKRIM AMMOUCHE, DIRECTION TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE, SETEC-LERM - BERNARD QUENEE, DIRECTION DE LA PRÉSERVATION DU PATRIMOINE, SETEC - MICHEL GUERINET, CONSULTANT BÉTONS POUR CET OUVRAGE, EIFFAGE - CLAUDE SERVANT, CONSULTANT, EIFFAGE

LE VIADUC DE MILLAU, SUR L'AUTOROUTE A75, A ÉTÉ RÉALISÉ PAR LE GROUPE EIFFAGE DANS LE CADRE D'UNE CONCESSION DE FINANCEMENT, CONCEPTION, CONSTRUCTION, EXPLOITATION ET ENTRETIEN CONFÉE PAR L'ÉTAT À SA FILIALE, LA COMPAGNIE EIFFAGE DU VIADUC DE MILLAU, CONCESSIONNAIRE DE L'OUVRAGE POUR 75 ANS. LE CONTRAT PRÉCISE UN OBJECTIF DE DURABILITÉ DE 120 ANS, NETTEMENT SUPÉRIEUR À LA DURÉE HABITUELLE DE 50 ANS POUR LES BÉTONS, À L'ÉPOQUE DE LA CONCEPTION DE L'OUVRAGE AU DÉBUT DES ANNÉES 2000. SEULS LES BÉTONS DES APPUIS SONT DONC CONCERNÉS, LE TABLIER ÉTANT ENTIÈREMENT MÉTALLIQUE. L'ARTICLE TRAITE DE LA DÉMARCHE " DURABILITÉ " ADOPTÉE POUR ATTEINDRE L'EXIGENCE DE 120 ANS.

L'OUVRAGE

Le viaduc de Millau qui constitue un des ouvrages majeurs du début du 21^e siècle est le plus important de l'autoroute A75 (figure 1). Il a pour objectif de résoudre les problèmes de trafic routier au droit de la

ville de Millau et également de faciliter le développement de l'axe autoroutier Nord-Sud en désenclavant le Massif Central.

Il permet de franchir la Vallée du Tarn à 5 km à l'ouest de la ville de Millau, à une altitude de 270 m.

3- Vue générale.

3- General view.

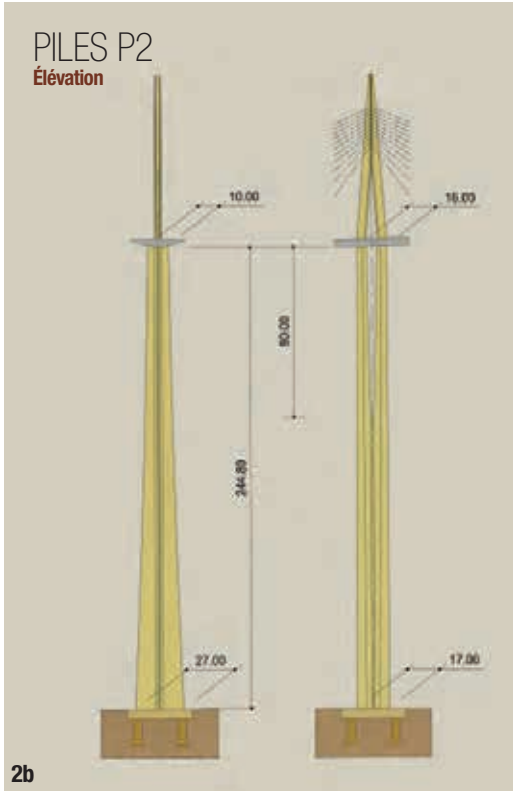
Le viaduc de Millau est un ouvrage exceptionnel multi-haubané, d'une longueur de 2 460 m, suivant une rampe constante de 3,025 % du nord au sud.

Le profil en travers de la chaussée présente une largeur utile de 26,45 m



© LEFRM

2a



2b

PILES P2
Élévation

entre dispositifs de retenue latéraux du type à 2x2 voies de circulation encadrées chacune par une bande d'arrêt d'urgence de 3 m et une bande dérasée de gauche de 1 m (largeur hors-tout de l'ouvrage y compris les corniches 32,05 m).

- 2- Piles P2 et élévation.
- 3- Environnement de l'ouvrage.
- 2- P2 piers and elevation view.
- 3- Environment of the structure.

La largeur du terre-plein central (4,45 m) a été conditionnée par l'encombrement des dispositifs de haubannage à nappe axiale. L'ouvrage est équipé de barrières lourdes et d'écrans de protection des usagers contre le vent latéral.

De telles caractéristiques confèrent à cet ouvrage le record du monde de longueur des ponts haubanés à travées multiples (2 460 m = 204 + 6 x 342 + 204 m) à nappe axiale ainsi que celui de la hauteur de piles P2 : 245 m et P3 : 223 m.

La conception générale du viaduc de Millau résulte de la recherche d'une adéquation entre les différentes contraintes imposées par le site et les considérations techniques et architecturales. Le choix d'un tablier métallique découle de la logique d'un tablier mince haubané permettant d'offrir le moins de prise aux vents violents existants à une telle hauteur au-dessus du sol.

Les piles de hauteur variable en fonction de la topographie du site et du profil en long de l'ouvrage, ainsi que les pylônes de 87 m de hauteur qui sont entièrement métalliques, participent à la résistance en flexion longitudinale (figure 2). Toutes les piles reposent sur un système de fondation semi-profonde constitué de quatre puits "marocains" de 5 m de diamètre maxi et de 9 à 16 m de longueur ancrés dans le substratum rocheux.

Le tablier est constitué d'un caisson métallique trapézoïdal de 4,20 m de hauteur maximale à l'axe avec un plâtelage supérieur orthotrope constitué de tôles de 12 à 14 mm d'épaisseur (14 mm sous la voie lente pour des problèmes de fatigue).



© EIFFAGE

3

FORMULE DES BÉTONS

	Formule		Designation	Constit. en cm	Resist. Fo 28j en Mpa	COMPOSITION										
	N°	Bat				Granulats				Ciment CBM102.5	Fumée de silice CONDENSIL	Super-plastifiant OPTIMA 175	Super-plastifiant GLENUM 27	Retardateur de prise CHRYSOT. CHR	Entraîneur d'air MICRO AIR 104	EAU Totale
						0/3 R	0/2 M	3/6 R	6/14 R							
PILES																
Fûts	3	Bis	B36 Fûts ST 15 +/- 3 (OP 0,5%)	15 +/- 3	35	864	316	660	300	30	1,85			107		
Semelle	7	Bis	B35 SEMELLES BIS ST 13 +/- 3 (OP 0,45% CHR 0,25%)	13 +/- 3	35	863	316	660	300	30	1,485	0,825		102		
	9		B35 SEMELLES BIS ST 13 +/- 3 (OP 0,45% CHR 0,30%)	13 +/- 3	35	863	316	660	300	30	1,485	0,99		102		
	10		B35 SEMELLES BIS ST 13 +/- 3 (OP 0,45% CHR 0,35%)	13 +/- 3	35	863	316	660	300	30	1,485	1,155		102		
Levées	8	Initiale	B60 G FL (OP 1,4%)	65 +/- 6	60	488	312	382	711	420	5,98			159		
CULEES																
Longines ØM4	11	Initiale	B35 G (G+3) ST 11 +/- 3 (OL 0,3% MA0,15%)	11 +/- 3	35	775	275	715	395		1,155	0,577		180		
Élévations	5	Dérivée	B35 Ø Dérivée ST 15 +/- 3 (OP 0,40% MA0,17%)	15 +/- 3	35	775	275	715	395		1,540	0,855		193		

4

© EIFFAGE

Le tablier a été réalisé par phases successives d'assemblages et de lançages à partir des plateformes aménagées derrière les culées C0 et C8.

Les opérations de lançage se sont terminées par le clivage des deux extrémités en porte-à-faux au-dessus de la vallée du Tarn au milieu de la travée P2-P3 (lançage de 1743 m côté Sud et de 717 m côté Nord).

Ces opérations se sont déroulées sous couverture météo avec une vitesse de vent maximale de 85 km/h.

L'ENVIRONNEMENT

L'ouvrage est situé dans un site remarquable, la vallée du Tarn et il relie, à 5 km à l'ouest de la ville de Millau, deux entités paysagères spécifiques : Le Causse Rouge au nord et le Causse du Larzac au sud (figure 3).

Le contexte climatique est le suivant :
→ Climat tempéré sec à tendance méditerranéenne ;

- Températures moyennes de l'ordre de 6°C en hiver et de 20°C en été ;
- Forte variabilité journalière des températures fluctuant avec une amplitude de 15°C ;
- Humidité relative comprise entre 60% et 85% ;
- Ensoleillement de 100 h/mois à 300 h/mois ;
- Vent violent avec des vitesses de pointe dépassant 150 km/h ;
- Précipitations pouvant dépasser 74 mm en 24 heures ;
- Neige : en moyenne 25 jours par an (jusqu'à 40 cm d'épaisseur) ;

→ Verglas : nombre moyen annuel de 65 jours avec gelée (station météorologique de Soulobres) ;

→ Brouillard : 60 jours par an en moyenne (station météorologique de Soulobres).

LES RISQUES

Vis-à-vis de la durabilité, les bétons sont principalement soumis aux catégories de risque suivants :

- 1- Risque de corrosion des armatures par migration des ions chlorures (issus des sels de déverglaçage) ;

4- Formule des bétons.

5- Presse pour mesure de la résistance à la compression.

4- Concrete mix design.

5- Press for measuring compressive strength.

2- Risque de dépassation des aciers par carbonatation du béton d'enrobage ;

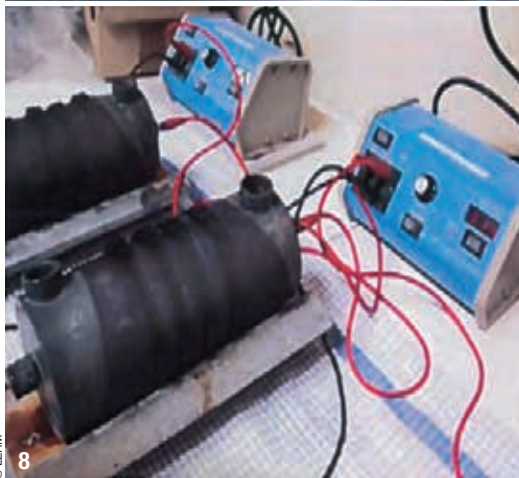
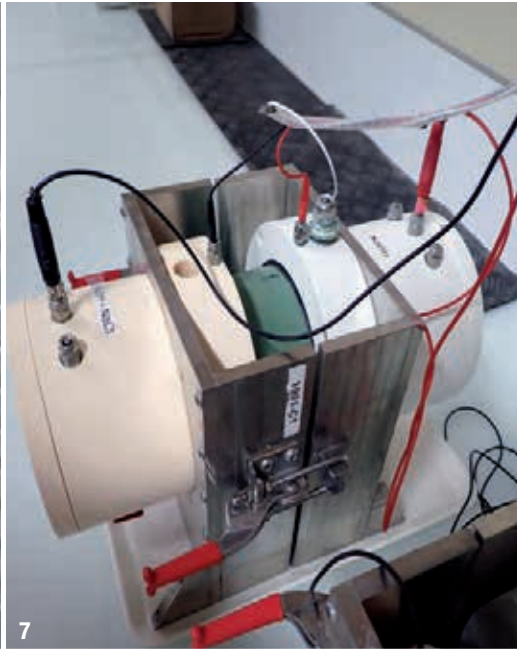
3- Risque lié aux réactions de gonflement interne, soit de type alcali-réaction (en liaison avec les alcalins du ciment et de granulats dits réactifs), soit de type réaction sulfatique interne (RSI) en lien avec l'exothermie du béton aux jeunes âges ;

4- Risque d'altération de l'aspect des fûts des piles, lié aux efflorescences (mise en place de jupes sur les coffrages) ;



5

© LEFRM



6- Éprouvette de béton instrumentée pour la mesure de module.

7- Dispositifs de mesure du coefficient de diffusion sous champ électrique.

8- Potentiomètre pour la mesure des teneurs en chlorures.

9- Perméamètre à oxygène (appareillage Cembureau).

10- Localisation des prélèvements de carottes de béton dans P2.

6- Instrumented concrete test specimen for modulus measurement.

7- Measuring system for the diffusion coefficient under an electric field.

8- Potentiometer for measuring chloride contents.

9- Oxygen permeameter (Cembureau device).

10- Location of concrete core samples in P2.

5- Écaillage sous les effets du gel/dégel.

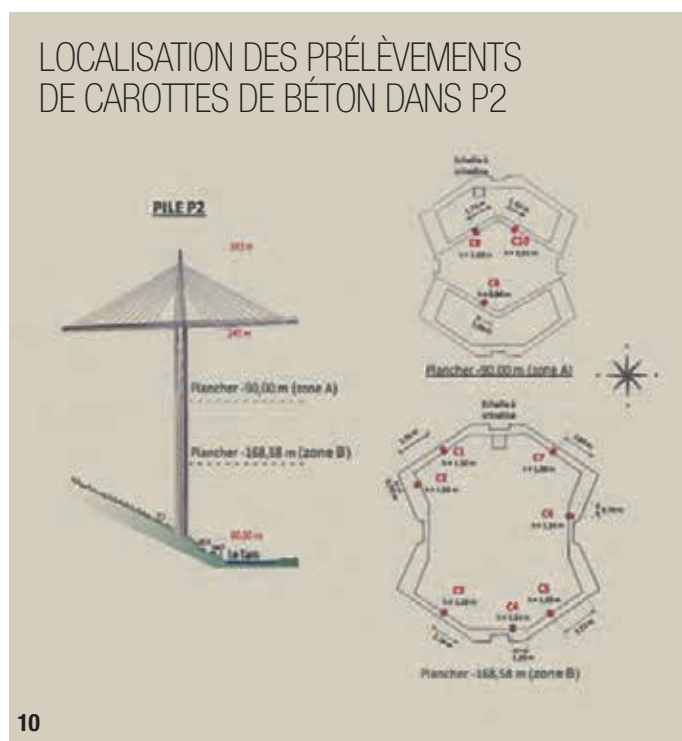
LA DÉMARCHE DURABILITÉ ADOPTÉE

La durabilité d'un ouvrage peut être traduite par son aptitude à résister dans le temps aux différentes agressions ou sollicitations (physiques, chimiques ou mécaniques) dues à l'environnement particulier du site de construction.

Il est donc nécessaire, dans une telle approche qui ne peut être que globale, de prendre en compte à la fois les aspects matériaux et structures.

La démarche "durabilité" adoptée depuis le début du projet de construction est le fruit d'une étroite collaboration entre le concepteur / constructeur et les laboratoires spécialisés dans l'étude des matériaux de construction.

Le suivi de la durabilité de l'ouvrage consiste principalement en un contrôle :



10

- Du comportement et de la durabilité des bétons de l'ouvrage (essais de vieillissement du béton, diffusion des ions chlorures, perméabilité à l'oxygène, épaisseur de carbonatation et suivi du fluage) ;
- De l'état de corrosion de la charpente métallique du tablier et des pylônes ;
- Du comportement de l'état des haubans.

Cet article ne traite que du comportement et de la durabilité des bétons de l'ouvrage.

Un facteur important de la durabilité des bétons armés et précontraints réside dans l'aptitude à les protéger de la corrosion. Pour ce type d'agression, il a été repris la démarche suivie au pont Vasco de Gama sur le Tage à Lisbonne, pour lequel Eiffage bénéficiait du retour d'expérience de Vinci acquise pour cet ouvrage exceptionnel soumis à une exigence de durée de vie similaire de 120 ans pour le béton de structure. ▷

Le but était aussi de garantir un faible coût d'entretien et de réparation, bien que le degré d'agressivité de l'environnement fut à Millau largement plus favorable (absence d'exposition marine et de zones de marnage en particulier). Les critères performantiels retenus vis-à-vis du risque de corrosion des armatures sont les suivants :

- Porosité à l'eau (Afgc-Afrem) : 11-13% ;
- Perméabilité au gaz (Cembureau) : $< 1.10^{-17} \text{ m}^2$ à 90 jours ;
- Coefficient apparent de diffusion des chlorures (méthode Tang-Luping) : $< 1.10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ à 90 jours.

Par ailleurs, ont été prises en considération à la fois les spécifications du fascicule 65A imposées par le marché et celles connues de la future norme NF EN 206-1 encore en cours de mise au point lors de la période de préparation des bétons du viaduc de Millau. Les spécifications du béton des piles correspondent au chapitre BHP et la justification retenue pour les bétons est de type performantielle.

Les critères pris en compte pour formuler le béton ont été calés bien au-delà des futures spécifications correspondantes au document d'application nationale de la future norme européenne EN 206-1, la classe d'exposition XF1 à prendre en compte ayant été remplacée par la classe XF3.

Le choix de produits bénéficiant de la marque NF (ou d'un niveau de contrôle équivalent) a été privilégié.

Les formules de béton utilisées dont le nombre a été volontairement limité dans un but de simplification du suivi sont récapitulées dans la figure 4.

L'étude préalable des bétons et leur formulation avaient été l'objet de très nombreuses et importantes études au Lcpc puis au Lerm pendant une dizaine d'années depuis début 1990.

Le projet final retenu à l'issue de l'appel d'offre étant constitué d'un tablier métallique, certains critères retenus au niveau de ces études préalables n'étaient plus parfaitement adaptés et indispensables comme par exemple la résistance du béton pour laquelle un béton B60 était alors suffisant pour justifier les piles de la solution métallique à mettre en œuvre alors que pour un tablier en béton précontraint un béton de résistance 80 MPa (BHP 80) au minimum était nécessaire.

L'étude initiale des bétons avait été établie en utilisant des fumées de silice pour améliorer la résistance du BHP de la solution avec un tablier en béton, beaucoup plus lourd que celui de la

solution métallique réalisée (environ 3,5 fois plus).

Cette étude a été reprise pour tenir compte du fait qu'un béton B60 était suffisant pour justifier les piles, aussi a-t-il été décidé de ne pas utiliser des fumées de silice de façon à améliorer l'aspect de celles-ci en répondant aux spécifications de durabilité exigée.

L'enrobage des armatures a en outre été majoré par rapport à la règlemen-

tation en vigueur : 4 cm pour les piles et culées et 5 cm pour les semelles permettant ainsi de réduire le risque de dépassement des aciers liés à la carbonatation du béton d'enrobage.

LE CHOIX DES MATÉRIEAUX

Le choix de granulats et d'un ciment identiques pour toutes les formules de béton a été décidé dès le démarrage des études.

Ce choix, par sa simplification, permettait d'assurer la meilleure maîtrise de la production du béton et du stockage des composants en évitant, par exemple, les risques associés à des mélanges accidentels. En outre, la simplification du nombre de formules de béton et des composants en nombre réduit ouvrait la porte à un suivi dans le temps plus aisé. Le ciment retenu est le CEM I 52.5 N CE PM ES CP2 NF du Teil qui présente

TABLEAU A : RÉSISTANCE À LA TRACTION PAR FENDAGE

Réf. LERM	33946-C1	33946-C2	33946-C3
Élancement	1,80	1,97	1,96
Résistance à la traction par fendage mesurée (MPa)	6,90	5,90	5,95
Résistance moyenne à la traction par fendage	6,3 Mpa		

TABLEAU B : RÉSISTANCE À LA COMPRESSION ET MODULE D'ÉLASTICITÉ STATIQUE

Réf. LERM	33946-C4	33946-C5	33946-C6	33946-C7
Élancement	1,97	1,93	1,93	1,93
Module d'élasticité (GPa)		42,7	43,6	46,9
Résistance à la compression mesurée (MPa)	92,1	80,4	83,7	83,1
Résistance à la compression corrigée (MPa)	87,7	76,2	79,5	78,9
Module d'élasticité moyen		44,4 GPa		
Résistance à la compression moyenne corrigée		80,6 MPa		

TABLEAU C : COEFFICIENT DE DIFFUSION DES CHLORURES

Réf. LERM	33946-C10.1		33946-C10.2		33946-C10.3	
Fracture fraîche	Section 1	Section 2	Section 1	Section 2	Section 1	Section 2
Tension (Volt)	19,8		19,1		20,2	
Temps (heures)	75		72		48	
Température (°C)	21,7		21,7		21,6	
Hauteur (mm)	48,3		47,2		51,8	
x_d moyen (mm)	9,1	9,3	5,9	6,4	5,5	5,8
D (m ² /s)	1,8.10 ⁻¹²	1,9.10 ⁻¹²	1,2.10 ⁻¹²	1,3.10 ⁻¹²	1,6.10 ⁻¹²	1,7.10 ⁻¹²
Coefficient de diffusion moyen du béton (m ² /s)	1,6.10 ⁻¹²					

TABLEAU D : PERMÉABILITÉ À L'OXYGÈNE DU BÉTON

Réf. LERM	Taux de saturation en %	k (m ²) séchage à 80°C	k (m ²) séchage à 105°C
33946-C8	Sous échantillons		
	7 jours		
	33946-C8.1	48,3	Non mesurable
	33946-C8.2	46,6	Non mesurable
	33946-C8.3	42,8	Non mesurable
	Sous échantillons		
28 jours			
33946-C8.1	13,4	2,0.10 ⁻¹⁷	3,8.10 ⁻¹⁷
33946-C8.2	11,4	2,3.10 ⁻¹⁷	4,0.10 ⁻¹⁷
33946-C8.3	10,0	3,3.10 ⁻¹⁷	4,1.10 ⁻¹⁷
Perméabilité moyenne k (m ²)			4,0.10 ⁻¹⁷

TABLEAU E : MASSES VOLUMIQUES ET POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU DES BÉTONS

Réf. LERM	Masse volumique réelle (kg/m³)	Masse volumique apparente (kg/m³)	Porosité accessible à l'eau (%)
33946-C8.1	2440	2340	10,5
33946-C8.2	2440	2340	10,3
33946-C8.3	2450	2350	10,0
Moyenne	2443	2343	10,3

un faible taux d'alcalins, atout important même vis-à-vis de granulats exempts de tout risques de réactivité et qui apporte une garantie supplémentaire vis-à-vis de la protection contre les réactions de gonflement interne différé. Le dosage de 450 kg/m³ prévu à l'étude initiale du Lcpc a été réduit à 420 kg/m³ ce qui est favorable vis-à-vis de l'exothermie et du bilan en alcalin.

Les granulats retenus étaient principalement les calcaires de la carrière de Rascalat du fait de leur proximité et de leurs qualités vis-à-vis de la protection contre les risques de réaction du type alcali-silice.

Ces granulats étaient classifiés non réactifs. Leur diamètre a été limité à 14 mm afin d'éviter le risque d'un

coefficient de forme pénalisant pour la qualité des bétons tout en améliorant la maniabilité du béton frais. Un choix très sélectif de matériaux peu nombreux et parfaitement contrôlés a ainsi été privilégié pour la confection des bétons.

LES RÉSULTATS DES ESSAIS DE CONTRÔLE ENVIRON 10 ANS APRÈS LA CONSTRUCTION

L'annexe 10 du cahier des charges de la concession fixait l'objectif de caractériser et de suivre l'état des bétons du viaduc de Millau dans le temps afin que soit satisfaite l'exigence d'une durée d'utilisation de l'ouvrage de 120 ans sans qu'il soit nécessaire de procéder à un entretien et à des réparations majeures pendant cette période. Afin de satisfaire cette exigence de suivi

durabilité de l'ouvrage, les essais suivants ont été réalisés par le Lerm à la demande de la Compagnie Eiffage du Viaduc de Millau (Cevm) en décembre 2013 :

- Mesure de la résistance à la compression selon la norme NF EN 12504-1 (figure 5) ;
- Mesure du module d'élasticité statique selon la norme ISO 6784 (figure 6) ;
- Mesure de la résistance à la traction par fendage selon la norme NF EN 12390 ;
- Mesure du coefficient de diffusion des chlorures selon la méthode Tang Luping NT Build 492 CTM Rapid Test (figure 7) ;
- Mesure de la teneur en chlorures libres et totaux selon le mode opératoire recommandé par le groupe Afgc-Afrem (figure 8) ;
- Mesure de la perméabilité à l'oxygène selon le mode opératoire recommandé par le groupe Afgc-Afrem (appareillage Cembureau) (figure 9) ;

→ Mesure de la profondeur de carbonatation par aspersion d'une solution de phénolphthaléine sur fractures fraîches.

Il était prévu de contrôler le vieillissement du béton armé dans le temps par des mesures sur des parties d'ouvrage représentatives, afin de pouvoir suivre simultanément les indicateurs de la durabilité et le vieillissement du béton par des contrôles non destructifs (carbonatation, pénétration des chlorures) de blocs de béton exposés aux mêmes conditions d'environnement que l'ouvrage, prélevés dans les parties faiblement sollicitées sur des surépaisseurs de béton des piles P2 et P5.

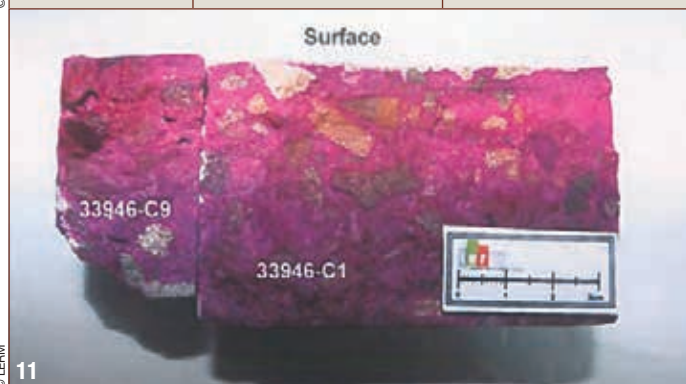
Afin d'offrir un béton exposé prélevable sans nuire à la résistance de la structure, il a été disposé une surépaisseur de la dalle située au droit du dédoublement des piles.

Avant de procéder aux essais en laboratoire, les investigations suivantes sur site ont été réalisées (figure 10) :

- 1- Implantation des carottages par auscultation radar afin de ne pas sectionner d'aciers passifs ;
- 2- Prélèvements à 2 niveaux différents de la pile P2 :
 - Plancher à la cote -168,58 m pour le prélèvement de 7 éprouvettes destinées aux essais mécaniques (bétons prélevés à l'intérieur de la pile) ;
 - Plancher à la cote -90,00 m pour le prélèvement de 3 éprouvettes destinées à la mesure des paramètres de durabilité (surépaisseur de bétons exposés à l'environnement extérieur).

TABLEAU F : PROFONDEUR DE CARBONATATION DES BÉTONS

Réf. LERM	Exposition	Profondeur de carbonatation
33946-C1	Intérieur de la pile	0 à 1 mm
33946-C9	Extérieur	0 mm



11- Profondeur de carbonatation du béton (prélèvement 33946-C9 / 33946-C1).

11- Concrete carbonation depth (sample 33946-C9 / 33946-C1).

RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES EN LABORATOIRE

Les résultats obtenus pour la mesure des caractéristiques mécaniques sont présentés dans les tableaux A et B.

L'exploitation de ces résultats appelle les commentaires suivants :

- La résistance moyenne à la compression corrigée est bien conforme à la classe de résistance du béton des piles (C60/75) ;
- La résistance moyenne à la traction par fendage sur la base des recommandations de l'Eurocode 2 conduit à une résistance moyenne à la traction directe de 5,6 MPa (90 % de la valeur de 6,3 MPa) qui peut également être estimée à partir de la formule suivante de l'Eurocode 2 pour les bétons de classe de résistance supérieure C50/60.

$$f_{ctm} = 2,12 \ln (1 + f_{cm}/10)$$
 - f_{ctm} est la résistance moyenne à la traction directe,

TABLEAU G : TENEURS EN CHLORURES DANS LE BÉTON

Réf. LERM	Profondeur de mesure	Teneurs en chlorures dans le béton (% massique)		Teneurs en chlorures ramenés à la masse de ciment (% massique)	
		Cl totaux	Cl libres	Cl totaux	Cl libres
33946-C9	0-10 mm	0,02	< 0,01	0,10	< 0,05
	10-20 mm	0,01	< 0,01	0,05	< 0,05
	20-30 mm	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05
	30-40 mm	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05
	40-50 mm	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05

- fcm est la résistance moyenne à la compression mesurée sur cylindre ;

→ Le module d'élasticité théorique estimé à partir de la résistance à la compression par l'Eurocode 2 - Tableau B par la relation suivante $E_{cm} = 2,2 (f_{cm}/10)$ avec :

- Ecm le module d'élasticité moyen
- fcm la résistance moyenne à la compression conduit à un module d'élasticité moyen égal à 41,1 GPa à comparer à la valeur mesurée de 44,4 GPa.

RÉSULTATS DES MESURES DES INDICATEURS DE DURABILITÉ

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants donnant le coefficient de diffusion aux ions chlore et à l'oxygène (tableaux C et D).

En outre, les porosités accessibles à l'eau mesurées en fin d'essai sont reportées dans le tableau ci-dessous (tableau E).

TÉMOINS DE DURÉE DE VIE

Les profondeurs de carbonatation et les teneurs en chlorures libres et totaux sont reportées dans les tableaux suivants (tableaux F et G).

Les conclusions tirées de ces résultats sont :

- Les profondeurs de carbonatation sont nulles, ce qui est conforme en regard de la faible porosité et des résistances élevées des bétons (figure 11) ;
- Les teneurs en chlorure sont globalement très faibles, en limite de détection de la méthode de dosage utilisée. À titre d'information,

la teneur en chlorure libres critique spécifiée actuellement par la norme NF EN 206/CN est de 0,4% de la masse de ciment dans le cas du béton armé et de 0,2% pour les parties précontraintes.

CONCLUSIONS

L'étude dont les résultats sont présentés dans cet article avait pour but de caractériser les bétons plus de dix ans après la construction des piles, dans le cadre du suivi durabilité de l'ouvrage. Elle a conduit aux résultats synthétisés dans le tableau suivant (tableau H). À titre indicatif, pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans, les recommandations provisoires du Lcpc "Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton - Application de l'approche performantielle" de mars 2010, donnaient les seuils d'indicateurs suivants à 90 jours pour des bétons exposés à une classe d'exposition XD3 (alternance

d'humidité et de séchage, béton exposé à des projections contenant des chlorures) :

- Porosité accessible à l'eau :
Peau 90j < 11 % ;
- Perméabilité au gaz :
K gaz 90j < $15 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$;
- Coefficient de diffusion apparent des chlorures :
Dapp 90j < $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

Les indicateurs de durabilité mesurés près de dix ans après la mise en service du viaduc sont bien conformes à ces seuils applicables à une exposition plus sévère des chlorures.

Il apparaît ainsi, sur la base des essais et analyses réalisés, que :

- Les caractéristiques mécaniques des bétons sont largement conformes à celles d'un béton de classe de résistance C60/75 ;
- Les indicateurs de durabilité sont bien dans l'ordre de grandeur des valeurs retenues lors de la concep-

tion de l'ouvrage et sont conformes aux seuils fixés par les recommandations provisoires de l'approche performantielle de mars 2010 du Lcpc ;

→ L'ensemble des indicateurs et des caractéristiques de vieillissement mesurés confirme l'efficacité des choix effectués en termes de formulation des bétons dans le but de garantir sur une période de 120 ans la durabilité des bétons de l'ouvrage.

Afin d'assurer le contrôle simultané de la durabilité et du vieillissement des bétons, il est prévu de poursuivre les mesures sur des prélèvements de carottes de béton de l'ouvrage à partir de la fin de la 9^e année d'exploitation de l'ouvrage avec une périodicité de 10 ans.

La prochaine campagne de mesure des indicateurs de durabilité se déroulera en conséquence à la fin de l'année 2023. □

TABLEAU H : SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DES MESURES

	Paramètres	Valeur moyenne mesurée	Spécifications à la conception de l'ouvrage
Caractéristiques mécaniques	Résistance à la compression	80,6 MPa	C60/75
	Module d'élasticité statique	44,4 MPa	-
	Résistance à la traction par fendage	6,3 MPa	-
Indicateurs de durabilité	Coefficient de diffusion des chlorures	$1,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	< $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ à 90 jours
	Perméabilité à l'oxygène	$4,0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$	< $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ à 90 jours
	Porosité accessible à l'eau	10,3 %	11 à 13 % pour les bétons des piles
Témoins de durée de vie	Profondeur de carbonatation	0 à 1 mm	-
	Teneurs en chlorures libres	Très faibles teneurs (<0,05%)	-

© LERM

ABSTRACT

MILLAU VIADUCT - DURABILITY MEASURES TO ENSURE A DESIGN WORKING LIFE OF 120 YEARS

THIERRY VAYSSADE, COMPAGNIE EIFFAGE DU VIADUC DE MILLAU - ABDELKRIM AMMOUCHE, SETEC- LERM - BERNARD QUENEE, SETEC - MICHEL GUERINET, EIFFAGE - CLAUDE SERVANT, EIFFAGE

The Millau viaduct is a structure financed and constructed by Eiffage Group under a concession arrangement. Its subsidiary, Compagnie Eiffage du Viaduc de Millau, is concession operator of the structure for 78.5 years, including 42 months for the duration of the works. The concession arrangement is due to end on 31 December 2079. The search for an aesthetically attractive structure led to the principle of a viaduct consisting of thin piers with slender lines and a very light deck, just touching the valley at only seven points (excluding abutments). In addition to the geotechnical tests, wind tests and standard tests required by the standards for the materials, supplies and equipment concerned, a very large number of tests have been carried out so far in order to validate the design and ensure that the required level of quality has been achieved with regard to the viaduct's design working life of 120 years. □

VIADUCTO DE MILLAU - PLAN DE DURABILIDAD PARA GARANTIZAR UNA VIDA ÚTIL DEL PROYECTO DE 120 AÑOS

THIERRY VAYSSADE, COMPAGNIE EIFFAGE DU VIADUC DE MILLAU - ABDELKRIM AMMOUCHE, SETEC- LERM - BERNARD QUENEE, SETEC - MICHEL GUERINET, EIFFAGE - CLAUDE SERVANT, EIFFAGE

El viaducto de Millau es una obra financiada y realizada por el grupo Eiffage en el marco de una concesión. Su filial Compagnie Eiffage du Viaduc de Millau es la concesionaria de la obra durante 78,5 años, incluidos los 42 meses de duración de los trabajos. La concesión terminará el 31 de diciembre de 2079. La búsqueda de una construcción estética ha llevado al principio de un viaducto formado por finas pilas con líneas espigadas y un tablero muy ligero, que tan solo roza el valle en siete puntos (a parte de los estribos). Además de las pruebas geotécnicas, los ensayos de resistencia a viento y los ensayos corrientes de materiales, suministros y equipos exigidos por las normas, hasta la fecha se han llevado un gran número de otros ensayos para validar el diseño y garantizar el nivel de calidad exigido para una «vida útil de proyecto» del viaducto de 120 años. □

SANTÉ • PRÉVOYANCE • ASSURANCES • ÉPARGNE • RETRAITE • VACANCES • ACTION SOCIALE

DEPUIS 70 ANS AUX CÔTÉS DU BTP

Acteur de référence du BTP, nous sommes aux côtés des entreprises, artisans, salariés et retraités de ce secteur pour les protéger, les assurer et les soutenir en cas de besoin. Nous nous engageons chaque jour à proposer des services qui vous aident à avancer avec sérénité.



PRO BTP
GROUPE

ASSURÉ POUR DEMAIN

www.probtp.com



POUR INTÉGRER VOS INTÉRIMAIRES... ? **QUI** VOUS ACCOMPAGNE ?

Anticiper, accueillir et accompagner vos intérimaires avec
LePackSECURITEinterimairesBTP.fr

Le PACK SÉCURITÉ

INTÉRIMAIRES BTP



OPPBTP