

Solutions béton

Les bétons projetés : définition, techniques de projection, formulation, utilisations, avantages et inconvénients	P. 2
ASQUAPRO : qualité, formation et certification	P. 4
Mise en œuvre des bétons projetés	P. 6
Mieux connaître les bétons projetés pour mieux les prescrire	P. 8
Spécificités des essais sur les bétons projetés	P. 9
Les bétons projetés fibrés	P. 10
Les innovations en matière de béton projeté	P. 11



Le béton projeté : un matériau technique, performant et innovant

Le **béton projeté** est une solution incontournable pour le confortement des terrains, lors de la réalisation de tunnels notamment, grâce à la possibilité de bétonner en s'affranchissant des opérations de coffrage. Le béton projeté est également une solution idéale pour la réparation ou le renforcement d'ouvrages compte tenu de son adhérence au support. Le béton projeté ne se limite pas à ces deux utilisations. Focus sur une technique performante en constant développement !

Textes, photos et conception des schémas : Sylvie Gérôme (EDF) avec la participation de Florian Bernard (Saint-Gobain) – Patrick Blondelle (Demathieu Bard) – Sébastien Bouteille (CETU) – David Chamoley (CETU) – Gilles Exel (Bekaert) – Laurent Fauquignon (UGC-Consulting) – Patrick Guiraud (CIMbéton) – Catherine Larive (CETU) – Abdel Mestari (ABCCR) – André Regnard (ASQUAPRO) – Damien Rogat (Vicat). Réalisation des schémas : Laurent Stefano.

Les bétons projetés : définition, techniques de projection, formulation, utilisations, avantages et inconvénients

DÉFINITION

Le béton projeté est un béton formulé à partir de ses constituants habituels, transporté dans un tuyau, accéléré par un jet d'air comprimé et mis en œuvre par projection sur un support auquel il adhère. L'énergie cinétique conférée par l'air comprimé compacte le mélange qui devient ainsi dense et homogène. Dans certains cas, cette force de compaction est complétée par l'impact des gravillons les plus gros qui viennent percuter le matelas de béton déjà mis en œuvre et accentuent le compactage du béton projeté.

Le mélange à projeter est composé de ciment, de sable, de graviers ou de gravillons et éventuellement d'eau, d'adjuvant (selon la technique de projection) et de fibres.

Cette technique de mise en œuvre s'affranchit donc des sujétions de coffrage, ce qui prédispose le béton projeté pour des utilisations spécifiques comme le soutènement de tunnels, le confortement de talus ou la réparation d'ouvrages en béton ou en maçonnerie.

DEUX TECHNIQUES DE PROJECTION : LA VOIE SÈCHE (VS) ET LA VOIE MOUILLÉE (VM)

Il existe deux techniques de projection qui se différencient, entre autres, par le lieu d'introduction de l'air comprimé et de l'eau, ce qui induit des comportements très différents selon la technique. On distingue :

- la projection par voie sèche, avec ou sans prémouillage ou préhumidification ;
- la projection par voie mouillée, qui elle-même se divise en deux méthodes :

- la projection par voie mouillée à flux dense,
- la projection par voie mouillée à flux dilué, cette méthode est rarement utilisée de nos jours.

Dans le cas de la projection par voie sèche, le mélange sec ou légèrement humide et de consistance pulvérulente est introduit dans la machine jusqu'à la lance est assuré par un flux d'air comprimé (transfert à grande vitesse). L'eau est ajoutée à la lance. Dans le cas de la projection par voie mouillée, le mélange, de consistance plastique, contient déjà toute l'eau nécessaire. Le transfert est mécanique : le béton est pompé, éventuellement additionné d'air comprimé pour en faciliter le transit (on parle alors de flux dilué). La projection est assurée par ajout d'air comprimé à la lance. La consistance des deux mélanges n'est donc pas comparable. Elle induit des différences en termes de comportement lors de la projection, de compactage du béton, de production de pertes et de poussière, et de rendement.

PRINCIPAUX DOMAINES D'UTILISATION

Les qualités des bétons projetés prédisposent l'emploi de l'une ou l'autre technique à :

La projection par voie sèche :

- travaux de réparation et de renforcement (forte résistance, grande adhérence et retrait réduit) ;
- rejointoiement des murs en maçonnerie à joint large (faible débit et grande adhérence) ;
- projection sur falaise et talus (forte résistance et grande adhérence) ;
- béton réfractaire (forte résistance et grande adhérence).

La projection par voie mouillée :

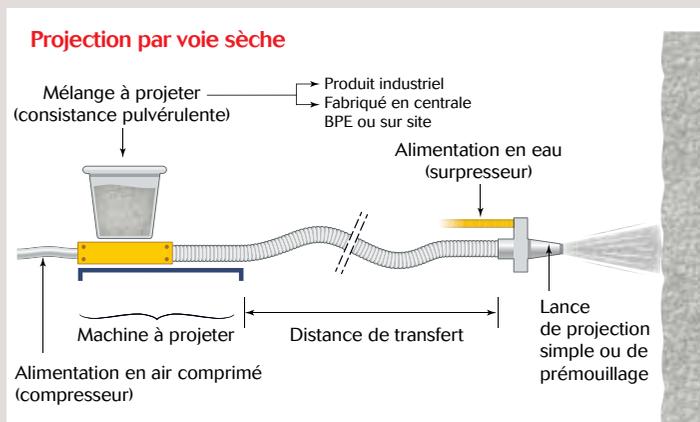
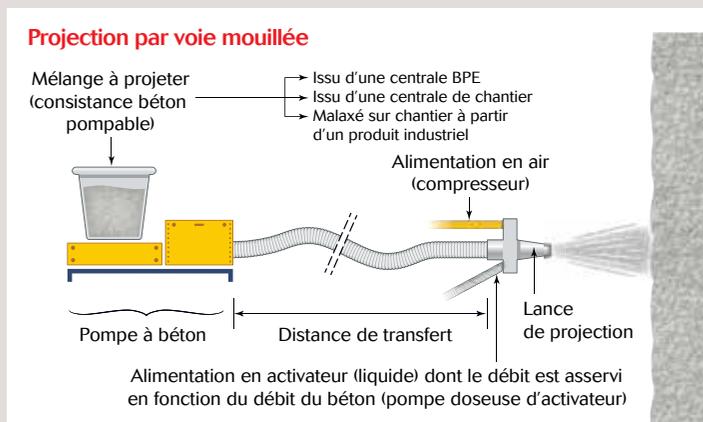
- soutènements en souterrain (fort débit, peu de poussière, résistance exigée moindre) ;
- protection des berges (fort débit, aucune adhérence nécessaire) ;
- projection verticale vers le bas (pas de piégeage des pertes) ;
- projection sur support fragile (faible force d'impact) ;
- rejointoiement de maçonnerie à joints étroits.

PRINCIPAUX AVANTAGES DE LA PROJECTION DE BÉTON

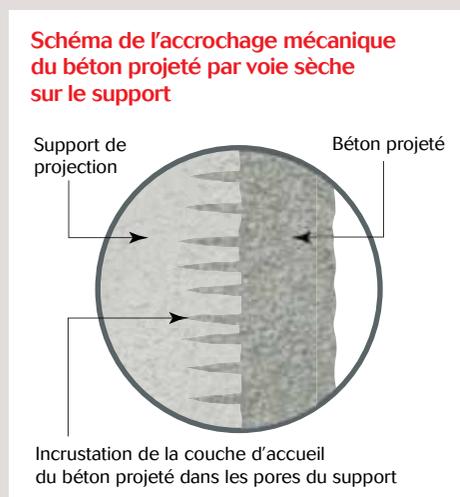
Le béton projeté adhère au support par collage de la pâte cimentaire, mais également, dans le cas de la voie sèche, par accrochage mécanique. En effet, la force de projection incruste les éléments les plus fins, donc la pâte de ciment, dans



→ Opérateur de projection en voie mouillée.



les pores du support et génère après hydratation une liaison mécanique qui augmente la résistance de l'interface béton-support. Les granulats arrivant sur le support rebondissent, d'abord en compactant la couche de pâte cimentaire puis la couche de béton en cours de constitution, et tombent au sol. Les pertes ainsi générées permettent d'améliorer la compacité du béton en place. Ces spécificités prédisposent donc le béton projeté par voie sèche à la reconstitution du monolithisme de la section de béton comme cela est nécessaire en réparation structurelle ou en renforcement (norme dédiée : *NF EN 95-102*, en révision en 2019).



L'adhérence du béton projeté sur son support permet de s'affranchir d'un coffrage. Cette absence de coffrage se traduit par un gain de temps, une réduction de la main-d'œuvre, qui représentent un réel avantage économique. Éventuellement, un coffrage localisé peut être mis en place, en rive, pour la délimitation d'arêtes. La technique de béton projeté réduit les délais de mise en œuvre du béton et augmente la cadence du chantier. Cette technique est donc tout à fait pertinente, notamment pour la mise en sécurité rapide lors du creusement de tunnels. La projection de béton a permis de réduire de 50 % le délai de réalisation des ouvrages souterrains, par rapport aux méthodes anciennes de confortement. Le support du béton projeté peut être une surface en béton ou en maçonnerie, le terrain, naturel ou une structure métallique ou en bois. L'adhérence du béton projeté nécessite un support peu friable et stable lors de la projection.

QUELQUES INCONVÉNIENTS

La projection de béton sur un support génère des rebonds et des retombées qui, même si les premiers participent à la qualité du béton en place, représentent un surcoût en termes de consommation de matériaux et de gestion de l'évacuation des pertes.

En plus des rebonds et des pertes, la projection est génératrice d'aérosols, sous forme de poussière humide (dans le cas de la voie sèche) ou d'eau, éventuellement chargée en accélérateur de prise (dans le cas de la voie mouillée). L'ensemble de ces éléments constitue un risque à prendre en compte, pour les personnes ou objets présents à proximité de la zone de projection. La démarche de formulation des bétons projetés n'est pas facile.

Pour la voie sèche en particulier, ce mode de mise en œuvre influence la composition du béton projeté par rapport au mélange initial, avec notamment un gradient du dosage en ciment dans l'épaisseur de la couche projetée. Pour la voie sèche comme pour la voie mouillée, l'épreuve d'étude en laboratoire diffère des démarches habituelles de formulation des bétons coulés et c'est seulement lors de l'épreuve de convenance que l'aptitude à la projection de la formule est vraiment vérifiée.

Dans ce domaine, une bonne expérience est nécessaire. Par ailleurs, il existe également des produits industriels « prêts-à-l'emploi » dont la « projetabilité » a été vérifiée lors d'essais préalables (ou démontrée sur des chantiers antérieurs).

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE CHAQUE TECHNIQUE DE PROJECTION

Bétons projetés par voie sèche

Avantages :

- tuyauterie/lance plus légère ;
- grande distance de transfert possible (1 200 m) ;
- nettoyage simplifié (mélange pas ou peu humide) ;
- fort compactage (résistance élevée et retrait réduit) ;
- bon enrobage des armatures ;
- forte adhérence mécanique (pénétration des fines du mélange dans le support) ;
- optimisation du rapport E/C (besoin en eau uniquement pour l'hydratation du ciment) ;
- enrichissement en ciment favorisant le collage ;
- parement « fermé » par une couche de laitance.

Inconvénients :

- production de pertes et de poussière ;
- respect des conditions d'hygrométrie pour les granulats dans le cas de la confection des mélanges *in situ* et en centrale BPE ;
- coût élevé du matériel (compresseur de forte puissance, abrasion des tuyaux et de la machine) ;
- rapport E/C en place non contrôlable et dépendant de l'expérience du porte-lance donc pas parfaitement maîtrisable, risque d'hétérogénéité du mouillage à la lance ;

- forte influence de la compétence du porteur (position de la lance et réglage de la teneur en eau), ce qui nécessite qualification/formation/certification du personnel de chantier.

Bétons projetés par voie mouillée

Avantages :

- formulation similaire à un béton coulé en place ;
- pas de modification de la composition du mélange avant et après projection ;
- dosage en ciment et en eau maîtrisable ;
- pertes limitées ;
- respect des supports fragiles.

Inconvénients :

- double adjuvantation nécessaire ;
- activateur générant d'éventuelles difficultés à remplir les zones derrière les armatures ou les treillis ;
- longueur de transfert réduite du fait des frottements (100 m) ;
- projection manuelle difficile au-delà d'un débit de projection de 6 m³/h (ou tuyauterie de diamètre supérieur à 60 mm) ;
- pertes contenant du ciment qui nécessite un nettoyage ;
- nettoyage du matériel et du chantier en fin de journée ou lors de longs arrêts.

DÉMARCHE DE FORMULATION DES BÉTONS PROJETÉS

La démarche de formulation d'un béton pour une mise en œuvre par projection doit à la fois prendre en compte les caractéristiques attendues du béton projeté en place, la technique de projection retenue (voie sèche ou voie mouillée), la « projetabilité » du mélange et, également, sa faculté d'être transporté depuis la machine jusqu'à la lance.

Dans le cas de la projection par voie mouillée, la formulation vise avant tout à la pompabilité du mélange et la résistance en compression attendue, l'activateur assurant sa tenue sur le support.

La pompabilité résulte de paramètres liés à la formulation (composition, teneur en fines, type de granulats, teneur et type de fibres, type d'adjuvants), au transport (longueur d'acheminement, diamètre, type de tuyaux et tracé) et au chantier (environnement, température lors de la mise en œuvre). Les paramètres de formulation favorisant la pompabilité sont également basés sur une optimisation du squelette granulaire.

Dans le cas de la projection par voie sèche, la formulation est guidée par une optimisation du squelette granulaire, pour favoriser le transfert dans les tuyaux, la projection sur le support et l'optimisation de la quantité de pertes. ■

ASQUAPRO : qualité, formation et certification

AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DE LA PROJECTION ET DE LA COMPÉTENCE DES OPÉRATEURS

Le choix de projeter le béton s'impose pour des ouvrages, des configurations, des types d'intervention et des fonctionnalités spécifiques, lorsque la mise en œuvre classique par coulage se révèle impossible, inadaptée ou délicate à réaliser.

Le béton projeté, plus encore que le béton coulé, est très dépendant du savoir-faire des personnels de mise en œuvre. Ses performances, voire l'adéquation de la formulation, ne sont contrôlables qu'après mise en œuvre. Du fait de cette singularité, le rôle du personnel qui gère la machine à projeter et tient la lance est déterminant :

- vérification du matériel, gestion des pièces d'usure, détection des anomalies ;
- réglage de l'alimentation de la machine, de sa vitesse, de son débit, des pressions ;
- réglage de l'hydratation ou de l'ajout éventuel d'adjuvant à la lance ;
- exécution du bon geste de projection (orientation du jet, mouvement elliptique, mouvement d'avancement) ;

- technique de projection (pied droit, voûte, présence d'armatures).

Le savoir-faire des porte-lances (voie sèche) et des opérateurs de projection (voie mouillée) est indispensable et doit être validé par le biais des formations et de la certification.

COMPÉTENCE DES OPÉRATEURS

Les formations relatives au béton projeté existent depuis plus de 20 ans. Elles couvrent la voie sèche, la voie mouillée, le pilotage de robot et la projection mécanisée.

Elles permettent de s'assurer des acquis des opérateurs de projection et de transmettre aux nouveaux opérateurs les bonnes bases pour projeter selon les règles de l'art. Elles enseignent aux porte-lances et aux pilotes de robot à la fois les gestes avec lesquels on obtient un béton de qualité, mais aussi les gestes à éviter.

Ces formations comportent à la fois :

- **Une partie théorique** : présentation des différentes méthodes de projection, des constituants du béton et des adjuvants, des différentes machines, des impacts des pertes, de la résistance et de la compacité du béton, influence de

l'air, de l'eau, de l'orientation de la lance et de la distance lance-support et enfin sécurité (protections individuelles selon l'environnement) avec les risques liés à la projection.

- **Une partie pratique** : réception du matériel (machine, compresseur, surpresseur, tuyaux d'air et d'eau, lance) et des matériaux, installation du poste béton projeté et projection sous différentes configurations (sur paroi ou en plafond).

Les compétences développées concernent notamment les points suivants :

- **Choix du matériel de projection** : machine, tuyau, lance, surpresseur et compresseur, conditions de stockage.
- **Installation et organisation du poste de projection** : mise en place de l'équipement et préparation du mélange ou vérification de sa bonne disposition pour que le travail s'effectue dans des conditions optimales.
- **Réglage de la machine de projection** : débit d'air et de matériau, alimentation en eau (en voie sèche uniquement), anticipation d'éventuels problèmes.

- **Recherche d'adhérence** : préparation du support, orientation de la lance et conduite de la projection.

- **Enrobage des armatures (le cas échéant)** : gestuelle adaptée pour permettre la projection de béton derrière et autour des armatures.

L'objectif est de s'assurer que les opérateurs détiennent les bases d'un savoir-faire (connaissance du matériel, du matériau, de la projection et bien sûr de leur utilisation en toute sécurité) qui seront nécessaires pour un chantier maîtrisé en termes de qualité et de sécurité.

À l'issue de la formation, ASQUAPRO propose une certification (sur 2 jours) afin de valider les acquis théoriques et pratiques des opérateurs selon l'expérience et les notes théoriques et pratiques obtenues lors des tests. Les acteurs de cette certification sont un examinateur et le certificateur de l'ASQUAPRO. ■

ASSOCIATION ASQUAPRO

Créée en 1987 par Claude Resse, unanimement reconnu pour sa passion et sa maîtrise du béton projeté, l'ASQUAPRO (ASsociation pour la QUALité de la PROjection des bétons) est une association qui promeut la qualité des bétons projetés. Son objectif est double :

- élargir et diffuser les connaissances sur les bétons projetés afin d'en optimiser l'utilisation ;
- améliorer la qualité des travaux de projection pour pérenniser l'emploi de ce mode de mise en œuvre des bétons.

À ce titre, elle rédige et diffuse des fascicules de recommandations sur la pratique de la projection. Elle fédère des groupes de travail dont l'objectif est d'aider à la rédaction de CCTP, afin de favoriser la réussite des chantiers de projection. Elle a mis en place une certification des projecteurs, désormais complétée par une certification des encadrants de chantier. Elle mène des essais visant à améliorer l'état des connaissances des performances du béton projeté, pour permettre notamment une utilisation des bétons projetés pour des ouvrages structurants dimensionnés en conformité avec le Model Code 2010.



L'ASQUAPRO regroupe différents acteurs concernés par les travaux de projection du béton : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, fabricants ou loueurs de matériels, fournisseurs de matériaux, experts indépendants, responsables de bureau d'ingénierie, de laboratoire d'essais, d'entreprise et d'organisme public.



→ Confortement de talus par voie sèche.

CERTIFICATION ASQUAPRO

Dans le cadre de sa démarche pour améliorer la qualité des bétons projetés et développer cette technique, la certification française des opérateurs de projection, initiée par Claude Resse, membre fondateur de l'ASQUAPRO, a été créée en 1988. D'abord appelé Certificat Abrotec puis Certificat CRC, il se nomme désormais Certificat ASQUAPRO.

La certification, délivrée par l'ASQUAPRO, repose sur des référentiels spécifiques qui sont utilisés par l'examineur et le certificateur ASQUAPRO, tous les deux membres de l'ASQUAPRO.

Ces référentiels concernent :

- la certification des Porte-Lances (PL) béton par Voie Sèche (VS) ;
- la certification des Opérateurs de Projection (OP) par Voie Mouillée (VM) ;
- la certification des Pilotes de Robot (PR) pour la projection par Voie Mouillée (VM) ;
- la certification des Projeteurs Mécanisés (PM) par Voie Sèche (VS) ;
- l'aptitude à la Conduite des Travaux de projection pour les encadrants de chantier (ACTx).

Ces certifications se déclinent en quatre niveaux : aspirant, standard, confirmé et hautement qualifié. Elles reposent à la fois sur des compétences théoriques (contrôle des connaissances sur le béton, la projection, les règles d'hygiène et de sécurité) et sur des compétences pratiques (mise en situation sur site avec installation du poste et projection dans des caisses spécifiques).

Un référentiel à l'aptitude au contrôle interne des travaux de projection pour les chefs de chantier est à l'étude. Cette certification repose à la fois sur des compétences théoriques (le contrôle des connaissances théoriques sur les différentes méthodes de projection et l'hygiène et la sécurité) et sur des compétences pratiques (test pratique sur site en projetant sur des dalles tests ferrillées

avec vérification par l'examineur de l'installation du poste, du démarrage du poste, des réglages de l'air, de l'eau et enfin de la projection).

Ce certificat, délivré par l'ASQUAPRO, est nominatif et est valable 5 ans, renouvelable sous conditions (détaillées sur le site de l'ASQUAPRO).

Actuellement, la profession compte près de 500 personnes certifiées en activité réparties comme suit :

- | | |
|-------------------|--------------|
| ■ 380 PL (VS) | ■ 20 PR (VM) |
| dont 60 aspirants | ■ 10 PM (VS) |
| ■ 30 OP (VM) | ■ 50 ACTx |

Aujourd'hui, exiger une certification est dans l'intérêt de tous les acteurs de la filière de projection : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, responsable d'entreprise et personnel de projection. C'est aussi un geste environnemental dans la mesure où il permet, en optimisant les pertes, d'économiser des matériaux.

Pour le porte-lance, il s'agit d'une reconnaissance de son savoir-faire, qui met en valeur ses capacités et son expertise. Il pourra ainsi attester de son expérience, de la qualité de son travail. Il y trouve donc un intérêt tant personnel que professionnel.

Pour les entreprises, la certification permet de prouver l'aptitude de leurs opérateurs à effectuer correctement des travaux de béton projeté.

Pour la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre, cette certification les assure des compétences des opérateurs qui réaliseront le chantier et de la bonne qualité finale du travail. Elles sont en droit d'exiger une certification lors de tous travaux mettant en œuvre du béton projeté.

SPÉCIFICITÉS DES ÉPREUVES DE CONVENANCE

L'épreuve de convenance doit permettre de tester toute la chaîne de mise en œuvre du béton projeté : depuis la fabrication (produit industriel ou mélange issu d'une centrale BPE ou mélange confectionné sur place) jusqu'à la projection en passant par le transport dans les tuyaux. Cette épreuve doit donc être réalisée dans les conditions réelles de déroulement du chantier avec le même personnel, les mêmes matériaux, les mêmes supports, les mêmes équipements et la même méthode de projection que ceux qui seront utilisés durant la phase de production sur le chantier. Cette étape permet également de s'assurer de l'aptitude du mélange à être projeté.

Il est admis que les ajustements suivants soient confirmés à l'issue des épreuves de convenance :

- ajustement de la formule nominale (adjuvant, activateur, eau) ;
- dosage et choix des fibres.

Les épreuves de convenance doivent également faire le lien entre les caractéristiques du mélange à projeter visées par l'épreuve d'étude et les caractéristiques réelles du béton projeté.

Les essais réalisés lors de l'épreuve de convenance portent donc sur le mélange à projeter avant projection ainsi que sur le béton projeté dans des caisses ou éventuellement sur un support.

Par ailleurs, les épreuves de convenance et les essais réalisés doivent permettre, du fait de la spécificité des bétons projetés, d'ajuster les points suivants :

- les paramètres de fonctionnement des installations de projection ;
- l'étalonnage de la pompe d'introduction de l'activateur (le cas échéant) et son système d'asservissement ;
- la pression d'eau et d'air comprimé à la lance de projection.

Les épreuves de convenance doivent également inclure :

- la vérification de la technicité des opérateurs ;
- le contrôle qualitatif de la mise en œuvre du béton projeté (préparation de surface, état de surface, régularisation du relief du support (le cas échéant), homogénéité du béton, etc.).

Les résultats des essais réalisés lors des épreuves de convenance doivent satisfaire les exigences prescrites.

Mise en œuvre des bétons projetés

PRÉPARATION DU SUPPORT

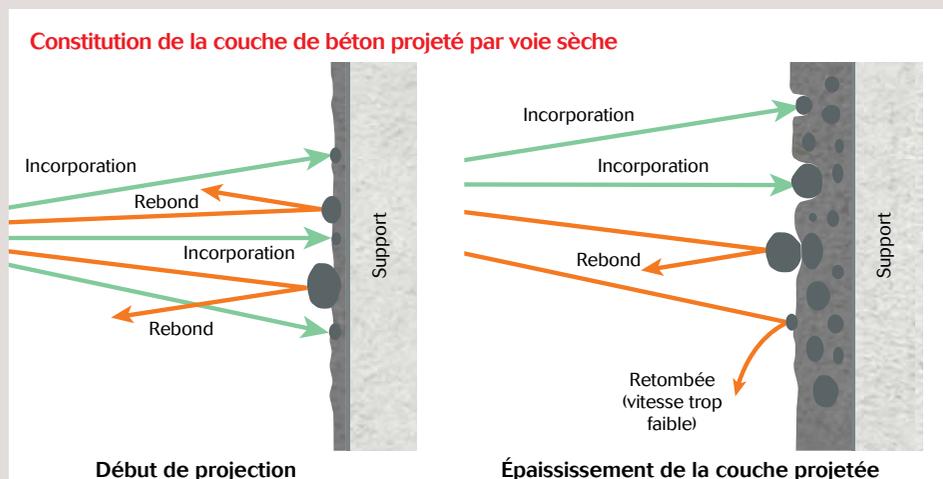
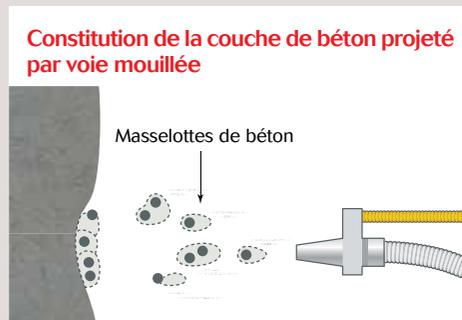
La préparation du support est importante notamment pour favoriser l'adhérence du béton projeté et dépend du type de travaux à réaliser. Elle consiste à purger les éléments non adhérents au support, nettoyer et humidifier à refus le support, et, le cas échéant, dégager les armatures en place. La projection de béton par voie sèche, du fait des fluides sous pression, est moins adaptée aux supports fragiles et friables. Pour ces supports, on privilégiera la projection par voie mouillée ou on prendra des précautions particulières pour le démarrage de la couche.

Quelle que soit la technique de projection, il est nécessaire d'humidifier le support (aspect mat, mais pas ruisselant) avant projection afin d'éviter un gradient hydrique au sein de la couche de béton projeté, ce qui entraînerait inévitablement sa fissuration.

A *contrario*, les venues d'eau à travers le support doivent être colmatées afin d'éviter le délavage et les chutes du béton fraîchement projeté.

RÉALISATION DE LA COUCHE DE BÉTON PROJETÉ SELON LA TECHNIQUE DE PROJECTION

Le mode de confection de la couche de béton projeté diffère d'une technique de projection



→ Réparation structurelle par projection de béton par voie sèche dans un environnement exigu et encombré.

à l'autre. Dans le cas de la projection par voie mouillée, cela s'apparente à des « masselottes » de béton qui se collent les unes aux autres sur le support pour former une couche de béton.

Dans le cas de la projection par voie sèche, l'air comprimé sert à véhiculer les granulats enrobés de matrice cimentaire. En début de projection, les granulats rebondissent sur le support après avoir plaqué la matrice cimentaire contre celui-ci, formant ainsi un « matelas » de pâte sur le support. Ensuite, ce matelas accueille les granulats qui continuent d'affluer, formant ainsi la couche de béton. Tout au long de la projection, le martèlement des granulats compacte le béton.

PERTES DE BÉTON ET NETTOYAGE DU CHANTIER

En béton projeté par voie sèche, on parle non pas de réduction des pertes mais d'optimisation. En effet, le process de réalisation de la couche

de béton projeté par voie sèche s'appuie justement sur les granulats qui vont frapper la couche déjà en place. Ils vont la compacter, rebondir et tomber au sol, soit parce qu'il n'y a pas assez de matière déjà en place pour qu'ils s'incrustent dans la couche de béton, soit parce qu'ils frappent un autre gravillon.

S'ajoutent à ces granulats et augmentent les pertes, les matériaux qui n'ont pas assez d'énergie pour arriver jusqu'au support ou s'y incrustent. Les pertes sont essentiellement constituées de granulats, ce qui génère un enrichissement en ciment, surtout dans les premiers millimètres de la couche de béton projeté. On comprend donc qu'une réduction trop importante des pertes en projection par voie sèche ne saurait être un gage de qualité.

Plusieurs facteurs influent sur la quantité de pertes : la formulation (matelas de pâte cimentaire), les granulats (nature et forme), le sable (quantité de fines), les réglages de projection (débit d'air et pression, distance lance-paroi, orientation de la projection), les contraintes du chantier (support, armatures, épaisseur des couches de béton projeté, position du support) et, de manière prépondérante, l'expérience de l'opérateur de projection. La production de pertes (rebonds et retombées) impose un poste de nettoyage du chantier plus efficace que pour les chantiers de bétonnage traditionnel.

Dans le cas de la projection par voie sèche, ces pertes (majoritairement des rebonds) sont quasi dénuées de pâte de ciment et donc assimilables en fin de journée à un stock de granulats assez aisément évacuable voire valorisable. En revanche, en voie mouillée, ces pertes sont des

petites « masselottes » de béton qui font prise et s'agglomèrent. Il est donc important de les évacuer à l'avancement. Leur gestion est une sujétion supplémentaire.

La quantité de pertes doit également être prise en compte pour ne pas excéder la capacité portante des échafaudages. Les pertes doivent être régulièrement évacuées de ces équipements (à minima à chaque changement de poste).

CONSEILS ET BONNES PRATIQUES POUR DES BÉTONS PROJETÉS DE QUALITÉ

Il est primordial que le béton projeté soit maîtrisé tant au niveau de l'opérateur (reconnaissance d'un travail bien exécuté) que de l'encadrement (choix des matériels, des matériaux, estimation des pertes et du rendement) et de la maîtrise d'œuvre et de la maîtrise d'ouvrage afin de minimiser les risques sur chantier.

Il est nécessaire, avant tout, de déterminer les besoins et de spécifier les exigences dans les pièces techniques des marchés :

- projection d'un béton défini et validé ;
- respect des épaisseurs ;
- obtention de l'adhérence à l'interface (entre le béton fraîchement projeté et le support et entre deux couches de béton le cas échéant) ;
- respect des performances mécaniques ;
- réduction des émissions de poussière ;
- respect des rendements du chantier (en tenant compte du volume des pertes) ;
- protection des opérateurs (protections individuelles notamment) et de l'ensemble des personnels en coactivité (à limiter).

Afin de répondre à l'ensemble de ces exigences, il est vivement recommandé que le choix du matériel et des matériaux soit défini par un encadrant de chantier compétent en projection.

Avant le début de la projection, tous les équipements disponibles doivent être contrôlés, leur état de fonctionnement doit être vérifié et la compatibilité des matériels les uns avec les autres doit être validée (à titre d'exemple, le branchement du groupe électrogène avec la machine à projeter afin qu'elle tourne dans le bon sens, le type de lance afin d'éviter les bouchons ou les coups de canon, la vérification de la pression de bridage du compresseur...).

En cours de projection, l'opérateur doit effectuer des réglages d'air et d'eau, adapter la distance lance-paroi en fonction du type de béton. Il doit obtenir l'épaisseur à réaliser, le bon compactage du béton, l'enrobage des éventuelles armatures et la résistance du béton escomptée, tout en limitant l'émission de poussière.

Il est indispensable que les opérateurs fassent leur réglage en fonction des besoins :

- pour la voie mouillée (VM), régler l'air à bon



→ Réparation d'un parement par projection par voie sèche.

escient (trop d'air génère beaucoup plus de poussière et allonge la distance lance-paroi, générant plus de pertes par retombées) ;

- pour la voie sèche (VS), régler l'eau (l'excès d'eau implique une moins bonne compacité, une chute de résistance et parfois des chutes de béton ; le manque d'eau génère beaucoup de poussière et une augmentation considérable des pertes) ;

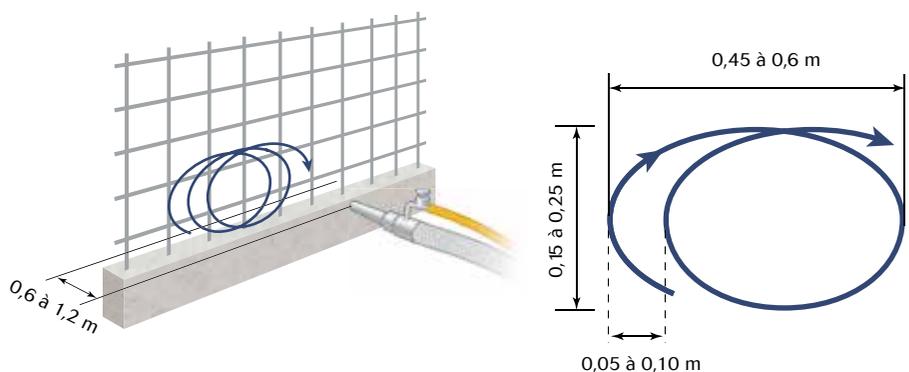
- pour la machine, régler le débit de béton (un flux trop important de béton va nécessiter des déplacements plus rapides des opérateurs et une émission de poussière plus importante ; un trop faible débit de béton va impliquer des discontinuités de flux et un rapport E/C très hétérogène) ;

- dans les deux cas (VM ou VS), régler la distance lance-paroi (une distance trop importante implique une augmentation des pertes et des vides mais permet une meilleure maîtrise de l'épaisseur et de la planéité ; une distance trop faible rendra difficile la maîtrise de l'épaisseur et de la planéité mais permettra une réduction des pertes).

Par ailleurs, la projection se fera toujours par une action circulaire au niveau de la lance afin d'homogénéiser le mélange sur le support et de maîtriser l'épaisseur.

Le choix du matériel est primordial et est la base d'une projection de qualité, d'où l'importance d'avoir sur un chantier un ou des opérateurs formés, certifiés et expérimentés. ■

Gestuelle de projection : mouvement circulaire



Mieux connaître les bétons projetés pour mieux les prescrire

Les bétons projetés suivent la plupart des règles de spécifications techniques des bétons coulés en place. Du fait de l'influence majeure de la mise en œuvre, la prescription intègre l'ensemble de la chaîne de production, de la formation à la mise en œuvre et aux contrôles de chantier.

GUIDES DE RÉDACTION DES CCTP

L'AFTES (L'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain) et l'ASQUAPRO collaborent pour mettre à jour des recommandations de l'AFTES relatives au béton projeté et compléter les fascicules techniques ASQUAPRO. Le parti a été pris d'orienter ces documents sous forme de Guide de rédaction des CCTP afin d'accompagner les maîtres d'œuvre dans la rédaction des pièces techniques et contractuelles.



Un premier document sur les bétons projetés par voie mouillée utilisés pour le soutènement « provisoire » a été initié par le CETU en collaboration avec le CEREMA. Des documents analogues sont en cours de rédaction pour :

- les bétons définitifs projetés par voie mouillée pour des travaux souterrains ;
- les bétons projetés par voie sèche.

PROBLÈMES RÉGULIÈREMENT RENCONTRÉS SUR LES CHANTIERS DE PROJECTION DE BÉTON

Le béton projeté est un matériau dont la particularité peut générer des problèmes potentiels lorsque :

- la prescription ne tient pas compte de la bonne pratique des bétons projetés :
 - nature du ciment non adaptée ;
 - dosage en ciment trop faible (dosage minimal recommandé : 400 kg/m³) ;
 - diamètre maximal des granulats trop élevé (granulométrie maximale recommandée : 12 mm) ;
- les délais sont trop courts pour la validation des convenances, voire des épreuves d'étude :
 - l'épreuve d'étude étant menée sur un béton non projeté, l'aptitude à la projection et les performances *in situ* du béton projeté ne sont vérifiées qu'au moment de l'épreuve de convenance, qui doit donc être suffisamment anticipée ;
 - en cas de non-conformité, la modification nécessaire du dosage en fibres peut remettre en cause l'épreuve d'étude initiale ;
- le personnel manque de compétence ;
- les matériels sont défectueux ou inadaptés. ■

BIBLIOGRAPHIE

Le béton projeté est un matériau complexe qui est la résultante, encore plus que pour les autres bétons, de la bonne adéquation entre la prescription, la formulation, la caractérisation et la mise en œuvre. C'est en ce sens que des guides et fascicules ont été élaborés pour accompagner les différentes étapes de réalisation d'un ouvrage en béton projeté.

Fascicules ASQUAPRO : téléchargeables gratuitement sur www.asquapro.com

- Santé, sécurité.
- Mise en œuvre des bétons projetés.
- Formulation des bétons projetés.
- Qualité des bétons projetés : contrôles.
- État des connaissances sur le dimensionnement du béton projeté.
- Utilisation des fibres pour le renforcement des bétons projetés pour le soutènement provisoire de tunnels.
- Utilisation des bétons projetés fibrés pour la réparation et le renforcement des structures.

Recommandations de l'AFTES : téléchargeables gratuitement sur www.aftes.asso.fr

- La conception et le dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains (GT20R1F1).
- La technologie et la mise en œuvre du béton projeté renforcé de fibres (GT6R3F1).
- La méthode de construction des tunnels avec soutènement immédiat par béton projeté et boulonnage (GT6R2F1).

Guides du STRRES : téléchargeables gratuitement sur www.strres.org

- Guide FABEM 5 – Béton Projeté.
- Recos-STRRES n° 11 – Réparation et renforcement par béton projeté par voie sèche.
- Recos-STRRES n° 18 – Réparation et renforcement par béton projeté par voie mouillée.

Normes spécifiques aux bétons projetés : téléchargeables sous condition sur www.afnor.org

- NF EN 934-5 – Adjuvants pour bétons projetés.
- NF EN 14487-1 – Béton projeté – Partie 1 : définitions, spécifications et conformité.
- NF EN 14487-2 – Béton projeté – Partie 2 : exécution.
- NF EN 14488-1 – Essais pour béton projeté – Échantillonnage.
- NF EN 14488-2 – Essais pour béton projeté – Résistance à la compression au jeune âge.
- NF EN 14488-3 – Essais pour béton projeté – Résistance à la flexion d'éprouvettes parallélépipédiques en béton renforcé par des fibres.
- NF EN 14488-4+A1 – Essais pour béton projeté – Adhérence en traction directe sur carottes.
- NF EN 14488-5 – Essais pour béton projeté – Détermination de la capacité d'absorption de l'énergie d'une dalle-éprouvette renforcée par des fibres.
- NF EN 14488-6 – Essais pour béton projeté – Épaisseur du béton sur un support.
- NF EN 14488-7 – Essais pour béton projeté – Teneur en fibres du béton renforcé par des fibres.
- NF P 95-102 – Réparation et renforcement d'ouvrages en béton et en maçonnerie – Béton projeté.

Spécificités des essais sur les bétons projetés

Les spécifications et la conformité doivent porter et être vérifiées sur le béton livré (avant projection) et sur le béton mis en œuvre (après projection).

SPÉCIFICITÉS DES ESSAIS SUR BÉTON PROJETÉ

La spécificité du béton projeté est liée à son mode de mise en œuvre. En effet, une fois projeté, le béton a une composition et des performances différentes de celles du mélange introduit initialement dans la machine (enrichissement cimentaire, effet de l'activateur le cas échéant).

Pour réaliser les essais sur béton projeté durci, il est donc nécessaire de prélever des corps d'épreuve soit directement *in situ*, soit dans des dalles d'essai confectionnées par projection (et non par coulage). Les caractéristiques à spécifier pour les bétons ou mortiers projetés sont définies dans la norme *NF EN 14487-1* complétée :

- pour les bétons réalisés en centrale à béton BPE : par la norme *NF EN 206/CN* (durée d'utilisation : 50 ans) ou par le fascicule 65 du CCTG (durée d'utilisation : 100 ans) ;
- pour les produits industriels : par la norme *NF EN 1504-3*.

Pour le mélange frais destiné à la projection par voie mouillée, les essais classiques (affaissement, masse volumique et teneur en air) sont réalisés sur le mélange avant projection.

La conformité des performances mécaniques du béton projeté est traditionnellement statuée sur la base d'essais à 28 jours. Néanmoins, pour ne pas retarder l'avancement du chantier, il peut être intéressant de prévoir, dans les marchés, les conditions à remplir pour pouvoir statuer plus rapidement. L'ASQUAPRO propose une méthodologie permettant de se baser sur les résultats des essais à 7 jours.

Par ailleurs, pour le contrôle de conformité du béton projeté sur chantier, la norme *NF EN 14487-1* définit des catégories d'inspection traduisant les exigences de durabilité de l'ouvrage, les risques potentiels et indique la périodicité des contrôles à réaliser suivant les cas.

SPÉCIFICITÉS DES CORPS D'ÉPREUVE EN BÉTON PROJETÉ

Les corps d'épreuve pour caractériser le béton frais ou durci doivent à la fois rendre compte des caractéristiques du mélange avant projection (voie mouillée) et du béton projeté. Des prélèvements sont donc réalisés dans le mélange avant projection et dans le béton projeté. Le prélèvement sur le support est une pratique difficile pour les bétons accélérés ou activés. L'obtention de corps d'épreuve cylindriques ou prismatiques se traduit par des prélèvements de béton projeté dans des caisses définies dans la norme *NF EN 14488-1*. Le respect d'un élanement de 2 pour

les éprouvettes cylindriques impose une épaisseur minimale de béton projeté. Ces caisses sont ajourées pour éviter de piéger des pertes et rebonds. La surface des caisses réalisées pour l'essai de capacité d'absorption de l'énergie est tirée à la règle juste après projection (dérogation par rapport aux normes).

ÉPREUVE D'ÉTUDE ET ESSAIS SUR MÉLANGES À PROJETER

Les caractéristiques du béton projeté ne sont mesurables qu'après l'action de projection. Il est admis de ne pas projeter le béton lors de l'épreuve d'étude, cependant l'effet de la projection (serrage, rebond, modification de la composition) et l'effet de l'activateur (le cas échéant) doivent être pris en compte au stade de l'étude. L'épreuve d'étude du béton projeté ne concerne donc que les caractéristiques du mélange à projeter. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes constituées de ces mélanges mis en œuvre par coulage dans des moules. Les valeurs obtenues dans ce cadre ne sont donc pas comparables aux valeurs que l'on est en droit d'attendre sur les bétons qui seront mis en œuvre par projection dans le cadre du chantier.

Dans le cas des bétons projetés par voie sèche, l'étude doit tenir compte du pourcentage de pertes par rebonds, majoritairement parmi les gros éléments, et de l'ajout d'eau au moment de la projection.

L'épreuve d'étude n'apporte donc aucune garantie quant à la « projetabilité » du mélange et le respect des spécifications requises. Cette spécificité justifie, encore plus que pour les bétons traditionnels, l'anticipation de la réalisation des épreuves de convenance pour valider la formule du béton. ■

Principaux essais de performance réalisés sur béton projeté durci

CARACTÉRISTIQUE	MÉTHODE D'ESSAI ASSOCIÉE
Résistance en compression	NF EN 12504-1 et NF EN 12390-3
Adhérence	NF EN 14488-4+A1 NF EN 1542 (si épaisseur < 50 mm)
Développement de la résistance au jeune âge	NF EN 14488-2
Résistance à la pénétration d'eau sous pression	NF EN 12390-8
Résistance au gel/dégel	NF P 18-424 (gel sévère et forte saturation en eau) NF P 18-425 (dans les autres cas) XP 14-420 (essai d'écaillage)
Épaisseur du béton projeté	NF EN 14488-6
Résistance à la traction par flexion de béton renforcé de fibres	NF EN 14488-3 (ou NF EN 14651+A1 en cas d'application du Model Code 2010)
Capacité d'absorption de l'énergie de béton renforcé de fibres	NF EN 14488-5
Teneur en fibres du béton projeté fibré	NF EN 14488-7 (dérogation sur le poids de l'échantillon prélevé : minimum 2,5 kg soit 1 l de béton minimum)



→ Projection dans des caisses ajourées pour éviter de piéger des pertes.

Les bétons projetés fibrés

FIBRES

Les fibres couramment utilisées dans les bétons projetés sont :

- des fibres métalliques conformes à la norme *NF EN 14889-1* (fibres d'acier ou fibres métalliques amorphes) ;
- des fibres polymères conformes à la norme *NF EN 14889-2*.

En fonction de leur nature, de leur forme, de leur géométrie et de leur dosage, les fibres confèrent au mélange à projeter et au béton projeté en place des propriétés physiques et mécaniques spécifiques :

- augmentation de la cohésion du mélange frais (pour un mélange à projeter par voie mouillée) ;
- amélioration de la cohésion du béton projeté frais sur le support ;
- augmentation de la résistance au cisaillement du béton projeté frais permettant une augmentation de l'épaisseur projetée ;
- limitation de la fissuration du béton projeté durci grâce à la répartition des contraintes de traction ;
- ductilité du béton projeté durci ;
- renforcement structurel du béton projeté durci par substitution des armatures par des fibres métalliques ;
- amélioration de la résistance à l'écaillage en cas d'incendie (microfibres polymères).

Les fibres métalliques sont utilisées pour augmenter la ductilité du béton projeté ou pour remplacer, partiellement ou totalement, les armatures du béton armé.

Elles peuvent être prises en compte dans le dimensionnement des ouvrages en béton projeté et ont été introduites dans le Model Code 2010.

En projection, des macrofibres synthétiques (de longueur supérieure à 30 mm) peuvent être utilisées, notamment pour augmenter la ductilité du béton. Elles ne rentrent actuellement pas dans le champ d'application du Model Code 2010, même si leur rôle est structurel.

Les microfibres synthétiques utilisées pour diminuer la fissuration de retrait au jeune âge ou pour limiter le risque d'écaillage des bétons soumis à un incendie sont rarement utilisées dans les bétons projetés. Elles peuvent l'être dans des cas très spécifiques, sous réserve de vérifier leur efficacité par rapport à l'objectif visé lors d'une épreuve de convenance.

La longueur courante des fibres structurelles doit être supérieure ou égale à 30 mm et à 2 fois le diamètre maximum des granulats.

La longueur des fibres métalliques doit être inférieure à 2/3 du diamètre du tuyau de projection.

DOSAGE EN FIBRES

DANS LES BÉTONS PROJETÉS

Les dosages en fibres couramment utilisés :

- pour les fibres métalliques : entre 20 et 50 kg/m³ selon le type de fibres et le type de travaux à réaliser ;
- pour les fibres polymères : entre 5 et 8, voire 9 kg/m³.

Pour les dosages en fibres métalliques inférieurs à 30 kg/m³, le béton étudié lors des épreuves d'étude en laboratoire est un béton « blanc », c'est-à-dire sans fibre. Le dosage choisi doit être justifié, notamment dans le cas des bétons projetés renforcés de fibres métalliques dimensionnés pour du renforcement structurel.

Le dosage en fibres est définitivement validé lors de l'épreuve de convenance au regard des essais réalisés et des résultats obtenus.



→ Prélèvement de béton projeté fibré pour l'évaluation de la teneur en fibres sur le support.

BÉTON PROJETÉ RENFORCÉ DE FIBRES MÉTALLIQUES (BPRFM)

Historiquement, les fibres métalliques ont été introduites dans la composition du béton projeté comme alternative au renforcement du béton à l'aide d'un treillis soudé.

Les études menées sur des bétons projetés renforcés par des fibres métalliques ont montré une répartition homogène des fibres dans la matrice cimentaire, une orientation de ces fibres dans un plan parallèle au support de projection et une finition acceptable, malgré la rugosité du parement final liée à la présence de fibres. Cette répartition optimise l'efficacité des fibres pour la résistance à la flexion. Le dimensionnement de ces bétons a été introduit dans le Model Code 2010, qui est en cours d'intégration dans les normes Eurocode. Les fibres métalliques ont également un avantage mécanique sur les treillis et les armatures : elles présentent un module de Young élevé (200 GPa) ainsi qu'une résistance en traction élevée (entre 1 300 et 2 300 MPa) pour les plus résistantes alors que les armatures sont limitées à 500 MPa. De plus, les fibres métalliques contribuent à limiter le fluage du béton.

Il a également été démontré que la résistance mécanique du BPRFM ne dépend pas directement du dosage en fibres dans le béton, mais du « kilométrage » de fil correspondant, qui peut aller de 6 à 950 km/m³ en fonction du type de fibres et de leur dosage. En effet, les fibres courent les fissures dans toute l'épaisseur du béton y compris au niveau du parement.

Enfin, l'absence de treillis soudé assure une adhérence optimisée du BPRFM sur la paroi, évitant tout risque de « vide » qui pourrait apparaître lorsque le béton s'agglutine contre les armatures.

ESSAIS DE FLUAGE PILOTÉS PAR LE CETU ET L'ASQUAPRO

Lorsque le béton projeté fibré est utilisé comme soutènement définitif, outre les performances à 28 jours, il y a une interrogation sur sa capacité à long terme à reprendre les poussées induites par les convergences du terrain, notamment après l'apparition des premières fissures dans le béton. Le rôle des fibres est de conférer au béton une résistance en traction après l'apparition de la fissuration. Cependant sur le long terme, comment se comportent-elles ? La structure possède-t-elle toujours suffisamment de performance pour maintenir son intégrité ?

C'est pour tenter de répondre à ces questions qu'un essai de fluage en « poinçonnement-flexion » sur béton projeté fibré a été développé conjointement entre les membres de l'ASQUAPRO, du CETU, de la SNCF et du laboratoire SIGMA BETON. Cet essai, d'une durée de 1 an, a fait l'objet d'une campagne à grande échelle en 2014 et de communications scientifiques. Un protocole complet a été mis au point, depuis la projection des corps d'épreuve en passant par leur préfissuration, le développement du bâti d'essais du système de mesure associé et l'analyse des résultats. De nouveaux tests pour affiner les protocoles et obtenir des données statistiques sont en cours de réalisation. ■



→ Essais de fluage par poinçonnement-flexion en cours sur les bâtis.

Les innovations en matière de béton projeté

Parmi les prospections diverses dans le domaine des bétons projetés, voici cinq sujets qui représentent des innovations favorisant le développement de la technique. Ces innovations sont soit en cours de développement, soit déjà utilisées et éprouvées.

FORMATION DES PILOTES DE ROBOT SUR SIMULATEUR

Malgré l'usage croissant des robots de projection et des bras manipulateurs (qui facilitent la manipulation de la lance ou prennent en charge une partie des mouvements), l'influence des opérateurs de projection (appelés aussi « pilotes de robot ») sur la qualité des bétons projetés reste primordiale. Les conséquences potentielles des mauvaises performances d'un pilote sont multiples :

- risques de chute de béton frais ;
- non-respect des épaisseurs exigées ;
- mauvaise qualité du béton en place ;
- pertes anormalement élevées, notamment en fibres ;
- pannes de matériel ;
- diminution des cadences de projection, ce qui impacte le planning du projet.

L'exigence de certification des opérateurs de projection, de plus en plus souvent imposée dans les marchés de travaux, va dans le sens d'une meilleure qualité. La certification permet de valider les acquis des pilotes de robot *in situ*. Elle s'adresse aux pilotes qui ont déjà une bonne maîtrise de la projection.

Pour les débutants, acquérir de l'expérience n'est pas simple car les enjeux des chantiers permettent difficilement de les mettre dans de bonnes conditions d'apprentissage ; de plus, les risques sont élevés en cas de mauvaise manipulation, allant de la mise en danger des personnels au bris de matériels coûteux, sans parler des taux de pertes anormalement élevés ou du non-respect des épaisseurs contractuelles (sur ou sous-épaisseurs).

Pour pallier ces difficultés, un simulateur de projection par voie mouillée est proposé depuis 2013 par une société suédoise. Il permet, quel que soit le niveau initial des opérateurs, de pratiquer en toute sécurité, de progresser sans nuire à la qualité de leurs premiers chantiers, de vérifier objectivement la qualité de la projection, même pour les pilotes les plus expérimentés, ou de se former sur un nouveau matériel.

Le simulateur restitue une image en 3D très réaliste par rapport au terrain et utilise exactement les mêmes interfaces que les véritables robots. Il analyse le mouvement, les réglages et le débit de la lance et délivre une indication très fiable sur les épaisseurs de béton mises en place et sur les taux de pertes.

Il est reconnu par la profession et est déjà utilisé, à l'étranger, en amont de nombreux chantiers pour la formation des pilotes dans les mines et les tunnels. Les coûts de formation peuvent être rapidement compensés par la diminution des pertes et des surépaisseurs. Compte tenu des volumes à projeter et des enjeux liés aux grands chantiers en cours ou en préparation, l'intérêt du simulateur de projection est particulièrement pertinent.

PROJECTION DE BFUP

La problématique de la réfection des buses métalliques a fait l'objet d'un concours d'idée auprès du « Comité Innovation Routes et Rues ». Le lauréat de la campagne 2016 est le groupement Ductal®-Freyssinet qui a proposé un renforcement de ces passages inférieurs au moyen d'un BFUP (Béton Fibré à Ultra hautes Performances) projeté sur une épaisseur minimale de 3 cm au sommet des ondes.

Cette solution présente des avantages multiples : réparation, conservation du gabarit de passage,

gain de temps, protection à long terme de la buse. La justification de cette coque mince a pu être réalisée à l'aide des normes dédiées au BFUP coulé (NF P18-470 et NF P18-710) après validation d'utilisation de ces dernières.



→ Projection de BFUP au cours du chantier expérimental.



→ Chargement transversal d'une buse témoin renforcée par projection de BFUP.

Un essai (échelle 1) a finalisé la vérification des méthodes de calcul, du comportement du matériau et de la structure sous chargement.

Le chantier expérimental de réparation d'une buse métallique sur le réseau routier a permis les adaptations nécessaires à la mise au point de son exécution et de cibler les problématiques à investiguer en vue d'autres opérations de réparation. La projection du BFUP offre des perspectives prometteuses pour le renfort d'ouvrages sur un plan structurel, mais également pour ceux nécessitant une couche protectrice appliquée en parement : protection contre la pénétration d'agents agressifs ou protection contre l'abrasion.

SYSTÈME D'ÉTANCHÉITÉ PROJETÉE CONFINÉE (SEPC)

La projection de béton est incompatible avec les revêtements d'étanchéité traditionnels de type DEG (Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane)



→ Éprouvette de béton intégrant la membrane SEPC.

mis en œuvre pour étancher les ouvrages souterrains. Une solution intéressante pour remédier à cette problématique est proposée par les Systèmes d'Étanchéité Projetée Confinée (SEPC) notamment dans le cas des tunnels revêtus en béton projeté définitif quelle que soit la technique de projection retenue.

Ces systèmes, à base d'EVA ou d'acrylate, sont couverts par un avis d'expert AFTES pour les ouvrages annexes à géométrie complexe ainsi que la rénovation-réparation d'ouvrages existants. Le SEPC peut être projeté sur le béton projeté de soutènement, qu'il soit fibré ou non, ou directement sur le support qui doit offrir une adhérence suffisante. Un traitement des venues d'eau au préalable est nécessaire (drainage, injection, imperméabilisation) ainsi qu'une préparation de surface du support.

Ce produit n'est plus à proprement parler une innovation puisque la RATP, la SNCF, le Grand Paris Express (GPE) ainsi que d'autres donneurs d'ordres l'ont déjà utilisé pour réaliser l'étanchéité de leurs ouvrages.

RENFORCEMENT DES RÉSEAUX HYDRAULIQUES VISITABLES PAR COQUES MINCES EN MORTIER PROJETÉ RENFORCÉ DE FIBRES MÉTALLIQUES AMORPHES PAR VOIE MOUILLÉE

Les réseaux hydrauliques souterrains visitables sont usuellement renforcés par projection par voie mouillée d'une épaisseur de 6 à 8 cm de mortier en plusieurs couches, associée à une armature en treillis soudé galvanisé.



→ Projection de mortier renforcé de fibres métalliques amorphes pour le renforcement de réseaux hydrauliques.

Une étude, réalisée entre 2013 et 2017, a permis de valider une méthode de dimensionnement et une loi de comportement représentative d'un mortier renforcé de fibres métalliques amorphes projeté par voie mouillée avec des épaisseurs inférieures.

La section (conduit et chemisage) peut ainsi être vérifiée aux états limites (ELS et ELLU), en tenant compte de la contribution des fibres métalliques amorphes à la résistance de la section après fissuration. Cette technique permet, selon une note de calcul à établir par un bureau d'études compétent pour chaque chantier, de réaliser des opérations de « chemisage structurant » avec des gains en épaisseur (épaisseur de 3 cm au lieu de 6 à 8 cm), en délais de réalisation et en pénibilité (suppression de la pose du treillis soudé).

On obtient ainsi une optimisation du coût global du chantier et une restitution plus rapide de l'ouvrage à l'exploitation. La très grande résistance à la corrosion des fibres métalliques amorphes ainsi que leurs retours d'expérience d'utilisation permettent, en outre, de présupposer une meilleure durabilité des réhabilitations ainsi réalisées.

UTILISATION DES LAITIERS DE HAUT- FOURNEAU POUR LA PROJECTION PAR VOIE MOUILLÉE

La projection de béton par voie mouillée nécessite dans la majorité des cas l'ajout d'un activateur (ou raidisseur ou accélérateur de prise) à la lance afin de garantir la tenue du béton sur le support. Ces adjuvants liquides relèvent de la norme *NF EN 934-5*.

Actuellement, la composition de ces produits est telle que leur combinaison avec des laitiers de haut-fourneau (ciments au laitier ou additions au laitier) génère un dégagement de sulfure d'hydrogène, un gaz très toxique. À ce jour, les prescriptions interdisent donc l'emploi de laitier dans les bétons projetés par voie mouillée.

Cependant, les « ciments au laitier » offrent de multiples avantages techniques en termes de durabilité et de performances mécaniques notamment dans des environnements agressifs. Le fournisseur de laitier (Ecocem) a donc trouvé une combinaison laitier moulu/activateur ne présentant pas cette incompatibilité. La solution se présente sous forme d'un accélérateur en poudre de nouvelle génération ajouté à la lance de projection. Les premiers essais de projection d'un béton substitué semblent encourageants notamment en termes de montée en résistance au jeune âge.

Lorsque l'activateur sera conforme à la norme *NF EN 934-5*, il offrira la possibilité de réaliser des travaux dans des environnements agressifs avec des liants appropriés. ■