

AIDE À LA RÉDACTION DE CCTP

*Bétons projetés par voie mouillée
pour les soutènements de tunnels*



En collaboration avec le  Cerema

Septembre 2017

Centre d'Études des Tunnels

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

AVERTISSEMENT

Les guides sont l'aboutissement de travaux de synthèse, de réflexion méthodologique, de recherche, de retour d'expérience, menés ou commandités par le CETU. Ils ont vocation à servir de référence pour la conception, la réalisation ou l'exploitation des ouvrages souterrains. Comme tout état de l'art à un moment donné, un guide peut toutefois devenir un jour obsolète, soit du fait de l'évolution des techniques ou des réglementations, soit par la mise au point de méthodes plus performantes.

*Aide à la rédaction de CCTP
Bétons projetés par voie mouillée
pour les soutènements de tunnels*

Septembre 2017

Centre d'Études des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

69674 BRON - FRANCE

Tél. +33 (0)4 72 14 34 00

Fax. +33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION	8
2 EXIGENCES DU BÉTON AVANT PROJECTION	11
2.1 Exigences générales du béton à livrer	11
2.2 Classes d'exposition	12
2.3 Durabilité – Classe de chlorures	12
3 EXIGENCES DU BÉTON APRÈS PROJECTION	13
3.1 Exigences générales du béton	13
3.2 Durabilité	14
3.2.1 Alkali-réaction	14
3.2.2 Réaction sulfatique interne	14
3.2.3 Résistance au gel-dégel	14
3.3 Caractéristiques mécaniques du béton projeté	14
3.3.1 Résistance à la compression à 28 jours	14
3.3.2 Résistance à la compression à 7 jours	14
3.3.3 Durcissement au jeune âge	15
3.3.4 Capacité d'absorption d'énergie à 28 jours (pour un béton fibré)	15
3.3.5 Capacité d'absorption d'énergie à 7 jours (pour un béton fibré)	16
3.3.6 Adhérence entre couches	16
4 CONSTITUANTS	17
4.1 Ciment	17
4.2 Granulats	18
4.3 Eau	18
4.4 Adjuvants et activateurs	18
4.5 Additions et liant équivalent	19
4.6 Fibres	19
5 MISE EN ŒUVRE DU BÉTON PROJETÉ	21
5.1 Conditions particulières d'exécution	21
5.1.1 Contraintes de site	21
5.1.2 Contraintes d'exécution des travaux	21
5.2 Fabrication, transport et livraison du béton à projeter	21
5.3 Mise en œuvre	22
5.3.1 Précautions particulières en fonction de la température	22
5.3.2 Conditions d'éclairage	22
5.3.3 Matériels	22
5.3.4 Préparation du support	23
5.3.5 Certification des opérateurs de projection	23
5.3.6 Projection	23
5.3.7 Épaisseurs mises en œuvre	23
5.3.8 Cure	24
5.3.9 Aspect fini	24
5.3.10 Réception du béton projeté	24

6 ÉPREUVES D'ÉTUDE, DE CONVENANCE ET DE CONTRÔLE	25
6.1 Généralités	25
6.2 Points d'arrêt et points critiques	25
6.3 Épreuve d'étude (avant projection)	25
6.3.1 Références probantes	26
6.3.2 Programme de l'épreuve d'étude	26
6.4 Épreuve de convenance	27
6.4.1 Généralités	27
6.4.2 Programme de l'épreuve de convenance	28
6.4.3 Consistance des essais de convenance (après projection) et critères de conformité	29
6.5 Contrôle intérieur pendant le chantier	31
6.5.1 Généralités	31
6.5.2 Essais sur chantier et critères de conformité	31
6.5.3 Fréquence des contrôles intérieurs pendant le chantier	33
6.6 Contrôle extérieur	34
ANNEXE 1 – SOMMAIRE TYPE D'UN CCTP	35
ANNEXE 2 – RÉFÉRENCES	36
ANNEXE 3 – EXEMPLE DE PROFILS TYPES DE SOUTÈNEMENT	38
ANNEXE 4 – CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES GÉNÉRALES APPLICABLES AUX MARCHÉS PUBLICS DE TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL – FASCICULE N° 65	40

MODE D'EMPLOI DU PRÉSENT GUIDE

Ce document, rédigé à l'initiative du CETU et de l'ASQUAPRO, a été finalisé en étroite collaboration avec M. Dierkens du Département Laboratoire de Lyon du Cerema Centre Est, sur la base du travail effectué par D. Chamoley, C. Larive (CETU) et M. Thone (RPhingénierie).

Il a fait l'objet de plusieurs relectures, dont celle du GT 6 de l'AFTES. Ce dernier regroupe différents MOA, MOE, entreprises et laboratoires spécialisés dans le béton projeté.

Il sera complété par une recommandation conjointe AFTES-ASQUAPRO pour l'élargir au béton projeté par voie mouillée pour les revêtements de tunnels. Puis, dans un second temps, une recommandation du même type couvrira le domaine des bétons projetés par voie sèche. En parallèle, ces documents alimenteront le groupe AFGC « Bien Prescrire les Bétons ».

OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

Le présent document est à l'attention des rédacteurs de marchés publics de travaux de soutènement de tunnels. Il est destiné à aider à la prescription et aux contrôles des bétons projetés par voie mouillée.

Il a pour objet :

- la définition de spécifications techniques (ou clauses techniques contractuelles) ; ces clauses sont repérées au sein des textes par un formalisme spécifique (bordure en marge) ;
- *la mise à disposition de précisions, commentaires ou recommandations repérés également par un formalisme spécifique (en italique, police grise plus petite).*

Les clauses ont pour vocation d'être contractualisées par les rédacteurs de marchés, par recopie à l'identique ou avec suppléments au sein des pièces particulières du DCE et du

marché de travaux. Les éléments surlignés **en orange** sont à définir par le prescripteur.

L'attention des rédacteurs est attirée sur le fait que le niveau d'exigences en matière de documentation (SOPAQ, SOPRE, SOGED...) doit être adapté au regard des enjeux, de la complexité des travaux et des contraintes extérieures (durée du chantier, sensibilité des milieux, montant de l'opération...).

Les marchés de travaux souterrains (y compris la phase de soutènement) doivent intégrer les dispositions du **fascicule 69** du CCTG travaux (en vigueur depuis le 1^{er} juillet 2012). Un guide d'application (décembre 2013) disponible auprès du CETU a pour objectif d'aider à l'élaboration du dossier de consultation des entreprises, à la mise au point du marché et au suivi des travaux.

Un sommaire type de CCTP complet relatif à la construction d'un tunnel est présenté en **annexe 1** du présent document.

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

Ce document a été élaboré à partir de l'ensemble des références citées en **annexe 2** :

- des fascicules techniques ASQUAPRO (téléchargeables sur le site www.asquapro.com),
- des recommandations de l'AFTES (téléchargeables sur le site www.aftes.asso.fr),
- des normes et fascicules de documentation en vigueur,

- des fascicules du CCTG Travaux,
- du guide de l'École Française du Béton (EFB) sur le choix des classes d'exposition en tunnel.

Les **points clés** ont été repris dans ce guide mais pour plus de détails, ces documents de référence, rendus contractuels, doivent être consultés.

CONFORMITÉ AUX NORMES

Ce guide fait référence à un certain nombre de normes en vigueur, citées tout au long du texte et reprises en **annexe 2**, qui devront également être référencées dans le CCTP du marché.

Pour les références datées, seule l'édition datée s'applique. Pour les références non datées, c'est la dernière édition en vigueur qui est prise en compte.

GLOSSAIRE DES SIGLES ET ACRONYMES UTILISÉS

ACI : American Concrete Institute

AFTES : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain

ASQUAPRO : Association pour la QUALité de la PROjection des bétons

BA : Béton Armé

BPE : Béton Prêt à l'Emploi

BPS : Béton à Propriétés Spécifiées

CCTG : Cahier de Clauses Techniques Générales

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières

DEG : Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane

EVCP : Évaluation et Vérification de la Constance des Performances

MOA : Maître d'Ouvrage

MOE : Maître d'Œuvre

OEAP : Conseil Scientifique de l'Observatoire Économique de l'Achat Public

PGC : Plan Général de Coordination

PPSPS : Plan Particulier de Sécurité et de Protection de la Santé

PQ : Plan qualité

PRE : Plan de Respect de l'Environnement

TOS : Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains (jusqu'en décembre 2009)

TES : Revue Tunnels et Espace Souterrain (à partir de janvier 2010)

SOPAQ : Schéma Organisationnel du Plan Assurance Qualité

SOPRE : Schéma Organisationnel du Plan de Respect de l'Environnement

SOSED : Schéma d'Organisation et de Suivi de l'Évacuation des Déchets

VM : Voie Mouillée

INTRODUCTION

GÉNÉRALITÉS SUR LES SOUTÈNEMENTS EN TUNNEL

Le creusement d'un tunnel par méthode conventionnelle nécessite généralement la mise en place d'un soutènement de composition variable selon la nature du terrain, la section de l'excavation et la méthode utilisée (pleine section, section divisée...). Les méthodes courantes d'exécution conduisent à l'utilisation d'un **soutènement** constitué d'éléments métalliques (boulons et/ou cintres, tôles, voire treillis soudés) et/ou de béton (projeté fibré ou non, prévoûte bétonnée, voussoirs en BA).

Le soutènement a pour but ou pour effet de :

- garantir la sécurité du personnel travaillant dans le tunnel contre d'éventuelles chutes de blocs,
- assurer la stabilité des parois du tunnel pendant l'exécution des travaux, en attente du revêtement généralement mis en place,
- participer à la stabilité définitive de l'ouvrage en réduisant ou en répartissant les efforts supportés par le revêtement en béton coffré.

Pour garantir son efficacité, il doit être défini précisément, en prenant en compte les caractéristiques du terrain encaissant :

contact soutènement-terrain, renforcement rapide, capacité d'adaptation à la forme de la section, continuité entre les éléments mis en place...

Les profils types de soutènement définissent, sur une section transversale de tunnel, la géométrie, la nature et la qualité des matériaux propres au soutènement, et ceci pour chaque zone pouvant être considérée comme homogène vis-à-vis des contraintes de terrain et d'environnement.

À titre d'exemple, on trouvera en **annexe 3** les différents profils types de soutènement retenus dans le cas du tunnel de Talant sur la LINO de Dijon (21).

Le soutènement du **front de taille** n'est pas envisagé de façon systématique. Il est imposé en cas d'arrêt prolongé de l'excavation, prévu ou inopiné, supérieur à une semaine, lorsque le faciès géologique rencontré présente des éléments instables mettant en cause la sécurité du chantier, du personnel ou la stabilité du front, ou encore pour réduire les déplacements qui se produisent au moment de l'excavation.

LES BÉTONS PROJETÉS EN SOUTÈNEMENT DE TUNNELS

Ce document traite des bétons projetés par **voie mouillée** pour le soutènement de tunnels. Ils sont surtout choisis pour les travaux nécessitant des cadences importantes de projection (de 6 à 20 m³/h). La projection par voie mouillée consiste à pomper un béton déjà malaxé et à introduire l'air comprimé à la sortie de la lance. Pour plus de précisions sur les méthodes de projection, on pourra se référer au fascicule « Mise en œuvre du béton projeté » de l'ASQUAPRO.

En France, un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) étant quasi systématiquement mis en place, il est protégé par un béton coffré coulé ultérieurement, que l'on appelle le revêtement. On entend parfois parler de revêtement « définitif » mais on ne retiendra pas ce terme ici. Le soutènement mis en place dès la phase de creusement n'est pas pour autant « provisoire » puisqu'il reste bien sûr en place et conserve son efficacité (même s'il n'est généralement pas pris en compte pour le dimensionnement du revêtement). Ce terme « provisoire » était employé à l'époque où la durabilité des bétons projetés était médiocre à cause de l'emploi de silicates alcalins en tant

que « raidisseurs » ; ces produits avaient des effets néfastes sur les caractéristiques du béton et présentaient des risques graves pour la santé et l'environnement. De nos jours, les aluminates sont interdits par la réglementation ; les autres silicates doivent être exclus dans les marchés (voir §4.4).

La durabilité des bétons projetés est actuellement similaire à celle des bétons coulés. Ils sont d'ailleurs utilisés en tant que revêtement dans de nombreux pays, et parfois en France également. D'autre part, avec l'amélioration de la prise en compte des poussières sur les nouveaux matériels de projection, on observe l'utilisation de plus en plus fréquente du béton projeté par voie sèche pour le soutènement des galeries ou rameaux d'évacuation (de plus faibles sections). Pour ces deux raisons, d'autres documents seront publiés prochainement pour traiter, d'une part des bétons projetés par voie mouillée utilisés comme revêtement, d'autre part des bétons projetés par voie sèche.

Dans tous les cas, la formulation du béton doit être adaptée au contexte géologique, qui intègre les sollicitations du terrain encaissant à reprendre, par le biais des propriétés suivantes :

- montée en résistance rapide (déterminée par le durcissement au jeune âge),
- ductilité permettant de suivre la convergence du terrain sans rupture fragile (caractérisée par la capacité d'absorption d'énergie pour les bétons fibrés).

Les retours d'expérience montrent que, dans le contexte particulier du soutènement et des modalités classiques de mise en œuvre et de formulation, les problématiques de sécurité

liées à l'adhérence au support se posent dans les premières heures. Dans la mesure où cette propriété dépend fortement de la qualité du support de projection, qu'il n'existe pas d'essai fiable permettant de la caractériser dans l'intervalle de temps considéré et que seul l'effet « peau protectrice » ou « résistante » (soit une fonction de types 1 ou 2 selon la revue *TES 164 de mars-avril 2001*) est recherché, l'adhérence du béton projeté sur le support ne donnera pas lieu à des prescriptions particulières. En revanche, il y a lieu de prescrire une valeur minimale pour l'adhérence entre couches du béton projeté (cas d'un phasage d'exécution en plusieurs couches), à vérifier au moins pendant l'épreuve de convenance.

DURABILITÉ DES BÉTONS PROJETÉS DE SOUTÈNEMENT

Étant donné, en France, la mise en place quasi systématique d'un revêtement en béton coffré quelques semaines après le creusement, une année plus tard au maximum pour le cadre d'application du présent document, on admet que l'on ne prend pas en compte la corrosion par carbonatation (classe d'exposition **X0**) ni les attaques liées au gel en présence de sels (écaillage). Les faibles épaisseurs impliquées permettent de négliger le risque lié à une réaction sulfatique interne. De même, le risque de dégradation par alcali-réaction ne sera pas considéré compte tenu du fait que le revêtement final est réputé à même de reprendre les éventuels gonflements liés à un développement tardif de la réaction dans le béton de soutènement.

Les seules pathologies à prendre en compte sont donc celles pouvant altérer les propriétés du béton de soutènement

pendant l'intervalle de temps compris entre la projection et la mise en place du revêtement, à savoir :

- les attaques chimiques liées aux eaux de ruissellement et à la nature des roches en contact : prescription le cas échéant d'une classe exposition **XA1**, **XA2** ou **XA3**, en fonction des résultats des analyses à réaliser sur les eaux et sols concernés.
- la destruction par le gel interne en têtes de tunnel, lorsque l'ouvrage est situé en zone de gel sévère, que les venues d'eau sont importantes et que la durée de fonctionnement avant revêtement inclut une période hivernale : prescription le cas échéant d'une classe d'exposition **XF3** (cas rare).
- la dégradation des éléments métalliques noyés dans le béton : prescription le cas échéant d'une classe de chlorures **CI 0,40**.

MARCHÉ DE TRAVAUX DE SOUTÈNEMENT DE TUNNELS – DOCUMENTS À FOURNIR PAR L'ENTREPRENEUR

On rappelle ici les documents à fournir par l'entrepreneur pendant la mise au point du marché jusqu'à son exécution dans le cadre de travaux de soutènement de tunnels.

Concernant spécifiquement les bétons projetés, le prescripteur pensera à intégrer les spécifications suivantes :

Organisation de la qualité

Le « Guide d'harmonisation des clauses techniques contractuelles relatives aux documents, concernant le management de la qualité et le respect de l'environnement, à fournir par le titulaire d'un marché de travaux » (« fascicule 0 du CCTG Travaux ») définit des dispositions générales ou particulières relatives aux documents à fournir dans les différentes phases considérées d'une opération, vis-à-vis du management de la qualité et du respect de l'environnement. Il définit aussi des

dispositions détaillées relatives au programme et aux études d'exécution.

L'organisation de la qualité et la mise en œuvre des bétons doivent respecter les exigences définies par la norme NF EN 13670/CN. Pour l'application de cette norme, la classe d'exécution à retenir est la classe 3.

L'entrepreneur est ainsi tenu de fournir dès la période de préparation du chantier un **Plan Qualité** (PQ) dans lequel il décrit notamment comment il va étudier, réaliser et contrôler les différentes phases de mise en œuvre du béton projeté. Ce PQ est un document évolutif qui est enrichi tout au long de la vie du chantier. Il est composé :

- d'une note d'organisation générale (organigramme des responsables du chantier, désignation des sous-traitants,

des porte-lances ou pilotes de robots certifiés, principes de gestion des documents, des points d'arrêt associés à un délai de préavis et de levée, des anomalies...),

- des procédures d'exécution (matériels et méthodes et contrôles associés) concernant les ouvrages provisoires (échafaudages...), la préparation du support, le traitement des venues d'eau éventuelles, la mise en place du ferrailage éventuel, la projection du béton, le respect des épaisseurs,
- des fiches d'agrément des matériaux (ciments, granulats, additions, adjuvants, fibres, produit de cure...), matériels et équipements (centrales, carrières, machines à projeter, robot, compresseur, bétonnières portées, pompe à béton...),
- d'un plan d'organisation des essais et contrôles définissant les essais d'études et de convenance avant travaux et les contrôles intérieurs (internes, externes) en cours de travaux.

Hygiène et sécurité

L'entrepreneur est tenu de fournir un **PPSPS** (Plan Particulier de Sécurité et de Protection de la Santé) dans lequel il décrit les règles de sécurité qu'il compte prendre concernant :

- les travaux en atmosphère confinée et les émissions de poussières,
- les travaux nécessitant l'emploi d'énergie électrique, d'air ou de fluides comprimés,
- l'emploi de produits agressifs (adjuvants, activateur...),
- l'utilisation de matériels sensibles à la projection (risques de bouchons, usure ou éclatement des tuyaux et flexibles ; utilisation de robot de projection...),
- l'exposition du projeteur aux rebonds de granulats,
- le bruit,
- la circulation des engins dans le tunnel,
- les travaux concomitants...

Le dimensionnement des plates-formes de travail doit être justifié en tenant compte du poids des retombées du béton projeté (rebonds, pertes et chutes éventuelles de béton).

Protection de l'environnement

L'entrepreneur est tenu de fournir en début de chantier un **PRE** (Plan de Respect de l'Environnement) sous forme d'une note d'organisation générale dans laquelle il décrit comment il compte respecter les mesures environnementales liées au site et en particulier comment il gère les émissions de poussières et le rejet dans le milieu naturel (notamment des eaux de nettoyage des matériels utilisés pour le transport et la mise en œuvre du béton projeté).

En début de chantier, l'entreprise est tenue de fournir le plan de ses installations générales dans lequel les installations de stockage et de production de béton projeté doivent être clairement identifiées.

Programme d'exécution

Le calendrier prévisionnel des travaux de projection doit faire apparaître clairement les tâches critiques et leur enchaînement.

Un phasage détaillé des différentes couches de béton projeté prévues et le découps maximal (longueur maximale entre le soutènement complet et le front de taille) pour chaque profil de soutènement doivent être fournis.

Journal de chantier

Dans les journaux de chantier (ou rapports journaliers), outre les informations générales (personnels, matériels, conditions atmosphériques...), les phases de béton projeté, les quantités mises en œuvre (m³ livré), les durées de projection ainsi que les numéros de bons de livraison (si centrale BPE) doivent apparaître. Les résultats des contrôles intérieurs (suivi des épaisseurs, résultats d'essais tel la teneur en fibres, résistance mécanique aux jeunes âges...) et les éventuels incidents de chantiers (hors et en-profil) y seront également annexés.

Dossier de récolement

Il comprend :

- le synoptique des soutènements mis en œuvre (béton projeté, boulons, cintres...) et les éventuelles notes de calcul,
- le dossier d'étude et de convenance des bétons,
- le calendrier d'exécution définitif,
- le Plan Qualité définitif comprenant les fiches de contrôle de l'exécution et les éventuelles fiches de non-conformité renseignées,
- les résultats des contrôles sur chantier, exploités selon les règles de conformité du chapitre 6.5.2 du présent document.

Ces renseignements viennent compléter un document plus général indiquant les plans de tirs mis en œuvre, le traitement ou captage des venues d'eau...

Suite à ces éléments introductifs, sont indiquées ci-après, avec la mise en forme exposée dans le paragraphe « Mode d'emploi du présent document », les clauses de CCTP relatives au béton projeté de soutènement de tunnels.

EXIGENCES DU BÉTON AVANT PROJECTION

2.1 EXIGENCES GÉNÉRALES DU BÉTON À LIVRER

L'entreprise prescrira le béton à livrer sous la forme d'un Béton à Propriétés Spécifiées (BPS). Les valeurs à prescrire en termes de classes de résistance, ainsi que la mise en place d'un contrôle à réception, sont de la responsabilité de l'entreprise.

Les bétons doivent respecter les exigences définies dans le fascicule 65 du CCTG Travaux, version 2014, et dans la norme NF EN 13670/CN. Pour l'application de la clause 8.1 (1) de cette norme, les bétons sont spécifiés en conformité avec les normes NF EN 14487-1, NF EN 206/CN, NF P 95-102 et le FD P18-011.

Les modalités d'utilisation du fascicule 65 du CCTG version 2014 sont définies en annexe 4 du présent document.

Le béton projeté à livrer doit faire l'objet d'épreuves d'étude (en l'absence de références probantes) et de convenance en centrale BPE et/ou sur site.

Les désignations et destinations des bétons à livrer et leurs spécifications sont prescrites dans le tableau suivant :

Désignation du béton à projeter	Parties d'ouvrage	Classes d'exposition	Classe de teneur en chlorures	Dosage minimum en liant équivalent (kg/m ³)	Rapport Eff/Liant équivalent maximal	Nature du ciment	Caractéristiques complémentaires du ciment vis-à-vis de la durabilité	Dimension nominale supérieure du plus gros granulat (D _{max} en mm)	Nature des fibres
...

Exemple de prescription pour les cas courants :

Désignation du béton à projeter	Parties d'ouvrage	Classes d'exposition (cf §2.2)	Classe de teneur en chlorures (cf §2.3)	Dosage minimum en liant équivalent (kg/m ³) (cf §4.1)	Rapport Eff/Liant équivalent maximal (cf §4.1)	Nature du ciment (cf §4.1)	Caractéristiques complémentaires du ciment vis-à-vis de la durabilité	Dimension nominale supérieure du plus gros granulat (D _{max} en mm) (cf §4.2)	Nature des fibres (cf §4.6)
BPS1	Soutènement	X0	Cl 0,40 si macro-fibres métalliques ou pièces métalliques noyées, Cl 1,00 dans les autres cas	400	0,48	CEM I ou CEM III/A sans laitier	—	12,5	Macrofibres métalliques ou synthétiques

Il n'est pas recommandé de prescrire une classe ou une valeur cible de consistance. Ces valeurs étant dépendantes des modalités de mise en œuvre, elles sont de la responsabilité de l'entreprise. Elles doivent être définies par l'entreprise avant la réalisation de l'épreuve de convenance

et peuvent faire l'objet d'un ajustement à l'issue de celle-ci. Les valeurs habituellement utilisées sont de l'ordre de 150 ± 30 mm

2.2 CLASSES D'EXPOSITION

Les classes d'exposition retenues sont définies en référence à la norme NF EN 206/CN.

La (les) classe(s) d'exposition retenues est (sont) ...

La classe d'exposition X0 (en se basant sur le guide EFB relatif aux classes d'exposition en tunnel) est utilisée par défaut pour les soutènements dans les environnements ne présentant pas d'agressivité chimique ou de risque de gel (cf. Introduction).

Pour les bétons en contact avec un environnement chimiquement agressif (eaux du terrain encaissant, nature du terrain), une classe d'exposition XA1, XA2 ou XA3 doit être prescrite. Cette dernière devra

être définie en conformité avec la norme NF EN 206/CN, complétée par le FD P 18-011. La caractérisation de l'agressivité chimique de l'environnement (une analyse d'eau et/ou de sol) est à faire avant le lancement de la consultation des entreprises (à la charge du MOA).

Pour les ouvrages situés en zone de gel sévère (au sens du FD P 18-326) dont les bétons sont en contact avec des venues d'eau importantes et lorsque la durée du chantier englobe la période hivernale, la classe d'exposition XF3 peut être prescrite pour les zones à proximité des têtes de tunnel. Le guide EFB indique qu'en général, on considère que l'influence de l'environnement extérieur peut se faire sentir jusqu'à une distance de 200 m à partir des têtes. Cette distance pourra être ajustée par le MOA en fonctions des contraintes climatiques locales.

2.3 DURABILITÉ – CLASSE DE CHLORURES

La classe des chlorures retenue est définie en référence à la norme NF EN 206/CN.

Les classes à retenir sont les suivantes :

- béton non armé et sans pièce métallique noyée : **CI 1,00**
- béton armé ou avec pièces métalliques noyées ou avec fibres métalliques : **CI 0,40**.

EXIGENCES DU BÉTON APRÈS PROJECTION

3.1 EXIGENCES GÉNÉRALES DU BÉTON

Les bétons doivent respecter les exigences définies dans la norme NF EN 13670/CN. Pour l'application du 8.1 de cette norme, les bétons sont spécifiés en conformité avec les normes NF EN 14487-1 et NF P 95-102.

Les désignations et destinations des bétons projetés et leurs spécifications sont prescrites dans le tableau suivant :

Désignation du béton projeter	Parties d'ouvrage	Béton livré correspondant	Catégorie d'inspection selon la NF EN 14487-1	Résistance en compression (MPa)	Capacité d'absorption d'énergie (si béton fibré)	Caractéristiques complémentaires
...	<p>– Rc à 28 jours : ... MPa</p> <p>– Rc à 7 jours, au moins égale à 80 % de la valeur spécifiée à 28 jours et définitivement fixée après l'épreuve de convenue.</p>	<p>– E à 28 jours :</p> <p>• béton ≤ 30 MPa (mesuré) : ... J</p> <p>• béton > 30 MPa (mesuré) : ... J</p> <p>– E à 7 jours, au moins égale à 80 % de la valeur spécifiée à 28 jours et définitivement fixée après l'épreuve de convenue.</p>	<p>– Adhérence entre couches : min 0,8 MPa et fixée en convenue</p> <p>– Durcissement au jeune âge fixé en convenue.</p>

Exemple de prescription pour les cas courants :

Désignation du béton projeter	Parties d'ouvrage	Béton livré correspondant	Catégorie d'inspection selon la NF EN 14487-1 (cf. §6.5.3)	Résistance en compression (MPa) (cf. §3.3.1 et 3.3.2)	Capacité d'absorption d'énergie (si béton fibré) (cf. §3.3.4 et 3.3.5)	Caractéristiques complémentaires (cf. §3.3.3 et 3.3.5)
Béton fibré projeté par voie mouillée	Profils de soutènement P1 à P4	BPS1	2	<p>– Rc à 28 jours : 30 MPa</p> <p>– Rc à 7 jours, au moins égale à 80 % de la valeur spécifiée à 28 jours et définitivement fixée après l'épreuve de convenue.</p>	<p>– E à 28 jours :</p> <p>• béton ≤ 30 MPa (mesuré) : 700 J</p> <p>• béton > 30 MPa (mesuré) : 800 J</p> <p>– E à 7 jours, au moins égale à 80 % de la valeur spécifiée à 28 jours et définitivement fixée après l'épreuve de convenue.</p>	<p>– Adhérence entre couches : min 0,8 MPa et fixée en convenue</p> <p>– Durcissement au jeune âge défini en convenue.</p>

La résistance en compression est mesurée sur carottes après projection. Une perte de résistance de 10 à 25 % (selon dosage de l'activateur) est classiquement observée par rapport aux résultats obtenus sur le béton d'étude non projeté.

Cette résistance correspond à la valeur moyenne obtenue sur 5 carottes issues d'une même caisse (en écartant au plus 2 valeurs aberrantes : valeurs écartées de ± 20 % par rapport à la moyenne arithmétique

des résultats), après correction des valeurs pour les ramener à des résistances équivalentes sur carottes 15 × 30 ou 16 × 32 (cf. §3.3.1).

Après projection, la spécification porte bien sur une valeur moyenne et non sur une résistance caractéristique du béton.

3.2 DURABILITÉ

3.2.1 Alkali-réaction

Compte tenu du fait que le revêtement ultérieur est réputé à même de reprendre les éventuels gonflements liés à un développement tardif de la réaction dans le béton de soutènement, **la catégorie I** au sens du FD P 18-464 s'applique. Le niveau de prévention à appliquer est le niveau A. Aucune précaution particulière n'est donc à prendre vis-à-vis de l'alkali-réaction.

3.2.1 Réaction sulfatique interne

Non concerné, compte tenu des faibles épaisseurs, de l'absence de traitement thermique et ce malgré la montée en température liée à l'utilisation d'un activateur.

3.2.3 Résistance au gel-dégel

Se reporter le cas échéant (cf commentaires §2.2) aux recommandations du GT6 de l'AFTES relatives aux bétons projetés par voie mouillée pour le revêtement des ouvrages souterrains (à paraître).

3.3 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU BÉTON PROJETÉ

IMPORTANT : Pour des raisons pratiques liées au respect des cadences de chantier, le contrôle en cours de chantier pour la résistance en compression et la capacité d'absorption d'énergie sera réalisé de manière privilégiée sur la base de résultats obtenus à 7 jours. La conformité pour les épreuves de contrôle sera alors statuée à partir des résultats validés à 7 jours lors de l'épreuve de convenance et ponctuellement de résultats à 28 jours.

3.3.1 Résistance à la compression à 28 jours

La résistance moyenne en compression à 28 jours doit être supérieure à **... MPa**, pour des corps d'épreuve cylindriques dont les dimensions seraient 15 × 30 ou 16 × 32.

Les modalités de confection des corps d'épreuve et de réalisation des essais sont définies dans le chapitre 6 du présent CCTP.

En soutènement, le béton doit pouvoir suivre les mouvements du terrain et avoir un comportement ductile. Dans le cas général, l'obtention de résistances en compression élevées ne constitue pas un objectif pour la formulation des bétons projetés de soutènement, car cette caractéristique entraîne une déformabilité moindre pour le matériau et donc un risque plus élevé de fissuration en cas de convergence. Il est donc souvent contre-productif d'avoir une matrice béton trop performante.

Dans la plupart des cas, il n'est donc pas utile d'obtenir des résistances en compression à **28 jours** supérieures à **30 MPa**, même si cette valeur est souvent dépassée avec le dosage en liant et le rapport $E_{\text{eff/liant}}$ équivalent prescrits, ainsi que la recherche de montée en résistance rapide.

En cas d'utilisation de bétons développant des résistances en compression supérieures à 35 MPa, la teneur en fibres, voire leur nature, devra être adaptée pour garantir un comportement ductile du béton.

Les valeurs qui seront obtenues dans le cadre du chantier, à partir de 5 carottes de diamètre minimal 60 mm (en écartant au plus 2 valeurs aberrantes : valeurs écartées de ± 20 % par rapport à la moyenne arithmétique des résultats) issues d'une même caisse, devront être corrigées pour les ramener à des résistances équivalentes sur corps d'épreuve cylindriques 15 × 30 ou 16 × 32. Les corrections à utiliser sont celles définies dans les abaques de l'annexe nationale de la norme NF EN 13791/CN.

Dans le cas particulier de carottes de diamètre 60 mm et d'élanement 2, la correction à appliquer est :

$$\text{valeur}_{\text{sur } 15 \times 30 \text{ ou } 16 \times 32} = \text{valeur}_{\text{sur } 6 \times 12} / 1,075.$$

3.3.2 Résistance à la compression à 7 jours

La résistance en compression minimale à 7 jours doit être égale à 80 % de celle spécifiée à 28 jours.

Cette valeur est proposée par l'entrepreneur au maître d'œuvre pour validation, à l'issue des épreuves de convenance. Cette valeur sert de valeur cible pour les épreuves de contrôle.

Les modalités de confection des corps d'épreuve et de réalisation des essais sont les mêmes que ceux à 28 jours.

3.3.3 Durcissement au jeune âge

On entend par jeune âge l'évolution des performances mécaniques du béton au cours des premières 24 heures.

La norme NF EN 14488 2 nomme abusivement cet essai « résistance à la compression au jeune âge ». Il convient de parler plutôt de « durcissement » pour éviter toute confusion avec la résistance en compression. En effet, la corrélation entre les valeurs mesurées selon cette norme (méthode de pénétration d'une aiguille ou d'enfoncement d'un clou fileté) et les valeurs de résistance en compression (pouvant être prises en compte dans un dimensionnement) ne peut être faite que si elle est établie lors de l'épreuve de convenance.

Il est de la responsabilité de l'entreprise de spécifier et de contrôler les performances au jeune âge des bétons de soutènement selon les modalités de l'article 4.3 de la norme NF EN 14487-1 (béton J1, J2 ou J3) ou au moins pour des échéances clé, en tenant compte des spécificités du chantier (sécurité du personnel, cadence du chantier).

Pour cela, l'entrepreneur doit établir lors de l'épreuve de convenance une courbe de référence caractérisant le durcissement du béton projeté au jeune âge, au moyen de l'un des deux essais suivants selon la NF EN 14488-2 :

- essai d'enfoncement au clou fileté,
- essai de pénétration d'une aiguille.

Cette courbe servira de référence pour les contrôles en cours de chantier.

La réalisation de ces essais est particulièrement intéressante si un béton présentant un affaissement supérieur aux valeurs usuelles a été projeté. Cela augmente en effet le risque d'un durcissement plus lent.

L'attention de l'entrepreneur est attirée sur le nombre élevé de facteurs pouvant faire varier la vitesse de durcissement du béton et donc sur l'intérêt des contrôles internes avant retour des personnels dans les zones fraîchement soutenues.

3.3.4 Capacité d'absorption d'énergie à 28 jours (pour un béton fibré)

Il existe différentes méthodes pour spécifier la ductilité du béton projeté renforcé de fibres, en évaluant soit la résistance à la flexion (au premier pic, ultime et résiduelle) selon la norme NF EN 14488-3, soit la capacité d'absorption d'énergie selon la norme NF EN 14488-5. Ces méthodes ne sont pas directement comparables. La résistance à la flexion doit être spécifiée lorsque les caractéristiques du béton sont utilisées dans un modèle de conception structurelle. La valeur d'absorption d'énergie mesurée sur plaque est spécifiée lorsque l'accent est mis sur l'énergie devant être absorbée durant la déformation du terrain encaissant.

L'énergie absorbée est mesurée selon la norme d'essai NF EN 14488-5 sur des dalles de béton projeté de 60 cm de côté et d'épaisseur strictement comprise entre 10,0 et 10,5 cm.

Les modalités de confection des corps d'épreuve et de réalisation des essais sont définies dans le chapitre 6 du présent CCTP.

- Si la résistance en compression moyenne mesurée à 28 jours sur au moins 5 carottes (en écartant au plus 2 valeurs aberrantes), après correction, conformément au §3.3.1, est inférieure ou égale à 30 MPa, la valeur minimale d'énergie absorbée doit être de **... joules** pour une flèche de 25 mm.
- Si la résistance en compression moyenne mesurée à 28 jours sur au moins 5 carottes (en écartant au plus 2 valeurs aberrantes), après correction, conformément au §3.3.1, est supérieure à 30 MPa, la valeur minimale d'énergie absorbée doit être de **... joules** pour une flèche de 25 mm.

La capacité d'absorption d'énergie doit être déterminée pour chaque projet. Elle dépend du contexte géologique et géotechnique. On peut toutefois donner les indications générales suivantes :

Exemple de tableau de spécification pour un béton type ayant une résistance en compression mesurée sur carottes à 28 jours inférieure ou égale à 30 MPa après correction :

Application (béton \leq 30 MPa)	Absorption d'énergie minimale en J, pour une flèche de 25 mm
Béton projeté fonctionnant comme <u>peau protectrice</u> * et pour des roches / sols solides	500
Béton projeté fonctionnant comme <u>peau résistante</u> * et pour des roches / sols moyens	700

Pour des valeurs de résistance en compression mesurées sur carottes à 28 jours supérieures à 30 MPa après correction, les valeurs d'énergie doivent être supérieures et la ductilité de la rupture du béton vérifiée. Exemple de tableau de spécifications :

Application (béton > 30 MPa)	Absorption d'énergie minimale en J, pour une flèche de 25 mm
Béton projeté fonctionnant comme <u>peau protectrice</u> * et pour des roches / sols solides	600
Béton projeté fonctionnant comme <u>peau résistante</u> * et pour des roches / sols moyens	800

* termes définis dans la recommandation du GT 20 de l'AFTES (TOS n° 164 de mars-avril 2001).

À noter : Pour des terrains médiocres, des valeurs supérieures à 800 J peuvent être prescrites. À ce jour, on peut atteindre sans trop de difficultés 1000 à 1200 J.

3.3.5 Capacité d'absorption d'énergie à 7 jours (pour un béton fibré)

La capacité minimale d'absorption d'énergie à 7 jours doit être égale à 80 % de la valeur spécifiée à 28 jours.

Cette valeur est proposée par l'entrepreneur au maître d'œuvre pour validation, à la suite des épreuves de convenance. Elle sert de valeur cible pour les épreuves de contrôle.

Les modalités de confection des corps d'épreuve et de réalisation des essais sont les mêmes qu'à 28 jours.

3.3.6 Adhérence entre couches

L'adhérence moyenne à 28 jours entre couches de béton projeté doit être supérieure à **... MPa**.

Cette valeur doit être vérifiée lors de l'épreuve de convenance. La mesure doit être réalisée selon la norme NF EN 14488-4+A1.

Les modalités de confection des corps d'épreuve et de réalisation des essais sont définies dans le chapitre 6 du présent CCTP.

Une valeur de 0,8 MPa apparaît à ce jour comme la spécification maximale en voie mouillée. L'objectif à viser est d'obtenir des valeurs d'adhérence entre couches suffisantes au jeune âge.

CONSTITUANTS

La fourniture des matériaux est de la responsabilité de l'entreprise. Elle doit en conséquence imposer dans les conventions passées avec les fournisseurs ou producteurs les obligations du marché s'y référant.

Tous les matériaux ou composants entrant dans la composition du béton projeté ou ayant une incidence sur sa qualité sont proposés par l'entrepreneur au maître d'œuvre pour agrément

selon les modalités (procédures et délais) prévues au Plan Qualité. Ils sont définis par leurs caractéristiques, leur conditionnement et leur provenance.

Les constituants et les principes de formulation doivent respecter les prescriptions de l'ASQUAPRO (Fascicule Formulation version 2010).

4.1 CIMENT

Les ciments employés doivent être conformes aux normes NF EN 197-1, NF EN 197-2 et FD P 18-011. Les ciments bénéficient d'une certification de conformité émanant d'un organisme certificateur officiel. La marque NF Liant Hydraulique constitue une telle certification.

Pour un même béton, le ciment doit être le même (appellation normalisée, provenance...) pour l'ensemble du chantier.

Seuls les ciments de type CEM I ou CEM II/A sans laitier sont autorisés.

Des dérogations peuvent être accordées sur la base d'essais probants.

Pour assurer la montée en résistance rapide du béton de soutènement, il est recommandé d'employer des ciments de type CEM I 52,5 R.

Des retours d'expérience récents montrent que les ciments CEM III ne permettent généralement pas de garantir une résistance en compression élevée au jeune âge.

De plus, l'utilisation de ciments contenant du laitier est déconseillée en l'état actuel des connaissances du fait de l'interaction avec les activateurs non alcalins disponibles sur le marché. En effet, le soufre du laitier, dont la teneur est plus ou moins élevée, réagit avec l'acidité des activateurs non alcalins et dégage une quantité variable de gaz H₂S. Des études spécifiques sont à prévoir si l'on souhaite obtenir une dérogation.

Par dérogation au FD P 18-011, les bétons au contact des eaux pures (XA1 à XA3) ou des milieux fortement acides (XA3) seront également formulés avec ces types de ciment.

Il s'agit ici de gérer les contradictions survenant entre des exigences incompatibles, à savoir :

- la nécessité de monter rapidement en résistance et d'éviter tout dégagement d'H₂S (prescription d'un CEM I ou CEM II/A sans laitier),
- la prescription de ciments d'autres types par le FD P 18-011 pour les bétons en contact avec des eaux pures ou des milieux fortement acides.

L'accent est mis sur la sécurité à court terme, s'agissant de structures revêtues ultérieurement.

Pour les besoins du présent CCTP, les ciments suivants sont réputés résistants aux sulfates :

- les ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES),
- les ciments résistant aux sulfates (SR) au sens de la norme NF EN 197-1 et répondant aux exigences complémentaires de la marque NF – Liants hydrauliques,
- les ciments à base d'aluminates de calcium selon la norme NF EN 14647 (annexe A).

Le dosage minimum en liant équivalent est de 400 kg/m³, quel que soit le diamètre maximal (D_{max}) du granulats utilisé.

Ce dosage important favorise la pompabilité du mélange à projeter dans la machine et assure la montée en résistance rapide du béton projeté.

Un dosage inférieur à 400 kg/m³ peut être utilisé, mais il nécessite une formulation plus élaborée au niveau des ajouts en éléments fins (inférieurs à 63 µm).

Le rapport Eau_{efficace}/Liant_{équivalent} doit être au maximum de :

- 0,40 pour la classe exposition XA3,
- 0,45 pour la classe d'exposition XA2,
- 0,48 pour tous les autres cas.

Pour le cas particulier des ciments à base d'aluminates de calcium, une étude béton réalisée par des spécialistes s'impose. Le dosage en ciment devra être plus élevé et le rapport E/C ne pas dépasser 0,40. Une étude de formulation approfondie est nécessaire pour obtenir

une rhéologie robuste et adaptée à la pompabilité. Ce type de ciment peut répondre à des cas très particuliers pour lesquels, en plus de la résistance aux sulfates, une autre propriété est demandée : la très forte résistance au jeune âge.

4.2 GRANULATS

Les granulats doivent être conformes aux normes NF EN 12620 + A1, NF P 18-545 et satisfaire aux exigences du code A de la norme NF P 18-545 avec une ou deux caractéristiques pouvant être indicées B dans la limite des exigences suivantes :

- les études ou références doivent justifier l'obtention des performances requises et le maintien de ce niveau de performances dans le domaine de variabilité des caractéristiques considérées des granulats ;
- le coefficient d'aplatissement devra être inférieur ou égal à 20 (selon la norme NF EN 933-3) ;
- le coefficient d'absorption d'eau des granulats doit être inférieur ou égal à 2,5 %, mesuré selon la norme NF EN 1097-6, des dérogations locales sont acceptables sous réserve de justification ;
- le module de finesse de la partie sableuse 0,16-5 mm du mélange doit être inférieur à 2,5 obtenu selon la norme

NF EN 12620+A1. Pour cette partie sableuse, la valeur de la masse entre deux tamis de la série ne doit pas excéder 20 à 25 % (ce qui revient à réaliser une courbe la plus continue possible) ;

- le granulat fin ou sable doit avoir un équivalent de sable supérieur ou égal à 85 selon la norme NF EN 933-8.

La dimension du plus gros granulat est limitée à 12,5 mm maximum.

La courbe granulométrique des granulats du mélange de départ doit être conforme à la norme NF P 95-102 ou comprise dans les fuseaux de l'ASQUAPRO (Fascicule Formulation version 2010).

Pour les bétons de classe d'exposition XF3, les granulats doivent être non gélifs au sens de la norme NF P 18 545.

4.3 EAU

Elle doit répondre aux prescriptions de la norme NF EN 1008. L'eau provenant du réseau public d'eau potable est réputée conforme à la norme.

4.4 ADJUVANTS ET ACTIVATEURS

Les produits qui peuvent être utilisés pour faciliter la mise en œuvre du béton projeté et/ou améliorer sa qualité en place sont :

- des adjuvants pour béton,
- des activateurs ne contenant ni alcalin, ni silicate, dont la fonction principale est de permettre l'adhérence et le maintien en place immédiats, ainsi que la montée en résistance rapide du béton dès sa projection sur le support quelle que soit l'inclinaison de celui-ci.

Les adjuvants doivent être conformes aux normes NF EN 934-2+A1 et NF EN 934-5. Les adjuvants conformes à la norme NF EN 934-2+A1 doivent bénéficier d'une certification de conformité émanant d'un organisme certificateur. La marque NF-Adjuvants constitue une telle certification de conformité.

L'emploi de tout adjuvant/activateur doit être soumis à l'avis du maître d'œuvre et se conformer aux indications des fiches techniques des fabricants.

L'entrepreneur doit disposer, sur le chantier, d'un moyen de dosage automatique en activateur agréé par le maître d'œuvre.

Le dosage maximum en activateur doit toujours être inférieur à 10 % de la masse de ciment, cette valeur étant mesurée par une pompe doseuse asservie électroniquement au débit de la machine de projection. La valeur maximale sera validée par le maître d'œuvre lors des épreuves de convenance.

Pour l'activateur, la valeur habituellement utilisée sur chantier est de l'ordre de 6 à 7 %.

Il est recommandé de vérifier la compatibilité des différents adjuvants entre eux, ainsi qu'avec le ciment (si de type CEM I non R ou de type CEM II/A sans laitier). Pour cela, la réactivité entre le ciment et

l'activateur peut être étudiée au moyen de l'aiguille Vicat sur pâte de ciment selon la norme NF EN 196 3+A1 par comparaison avec une formule de référence ayant un dosage minimum de 400 kg/m³ en ciment CEM IR. Les critères de comparaison seront définis par l'entrepreneur et soumis à l'acceptation du maître d'œuvre.

En cas d'utilisation d'un agent entraîneur d'air, se reporter aux recommandations du GT6 de l'AFTES relatives aux bétons projetés par voie mouillée pour le revêtement des ouvrages souterrains (à paraître).

4.5 ADDITIONS ET LIANT ÉQUIVALENT

Les additions ne devront posséder aucun potentiel de nuisance, en particulier vis-à-vis de :

- la durabilité,
- la résistance (à long terme et au jeune âge),
- la mise en œuvre (besoin en eau, temps de prise...).

Les additions sont notamment utilisées pour améliorer la pompabilité et optimiser la compacité du squelette granulaire.

Sont autorisées :

- les fumées de silice, conformes à la norme NF EN 13263-1+A1,
- les additions calcaires, conformes à la norme NF P 18-508,

- les additions siliceuses, conformes à la norme NF P 18-509,
- les métakaolins, conformes à la norme NF P 18-513,
- les cendres volantes conformes à la norme NF EN 450-1.

L'utilisation d'additions contenant du laitier est interdite car incompatible avec les activateurs non alcalins actuellement sur le marché. En effet, le soufre, dont la teneur est plus ou moins élevée, réagit avec l'acidité des activateurs non alcalins et dégage une quantité variable de gaz H₂S. Des dérogations peuvent être accordées sur la base d'essais probants.

En cas d'utilisation de cendres volantes, la compatibilité avec l'activateur doit être vérifiée.

4.6 FIBRES

Il existe deux grands types de fibres : les fibres métalliques (NF EN 14489-1) et les fibres polymères (NF EN 14489-2). Dans les deux familles, on trouve des microfibrilles et des macrofibres. La limite est de nature géométrique : diamètre inférieur ou supérieur à 0,3 mm.

Les microfibrilles métalliques sont principalement utilisées pour les bétons à Ultra Hautes Performances. Les microfibrilles polymères sont essentiellement utiles pour limiter la fissuration au jeune âge due au retrait plastique et l'écaillage du béton soumis à un incendie.

En soutènement, on utilise à ce jour uniquement des macrofibres. Leur ajout améliore certaines caractéristiques du béton en vue de :

- répartir la fissuration de retrait à long terme,
- augmenter la résistance à la flexion et au cisaillement du fait du coutrage et d'une répartition de la fissuration d'origine mécanique,
- améliorer le comportement post-fissuration du matériau (ductilité).

Les fibres doivent respecter la norme NF EN 14889-1 pour les fibres d'acier et la norme NF EN 14889-2 pour les fibres polymères.

Le marquage CE basé sur le système d'EVCP 1, spécifique aux fibres structurelles, est exigé.

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

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

La longueur courante des fibres métalliques utilisées en soutènement est de 35 mm.

Plus les fibres sont élancées (longues et fines), plus elles sont performantes mais plus le risque de formation d'oursins augmente (pour les fibres métalliques). L'encollage des fibres permet généralement d'éviter les oursins dans le malaxeur.

Les fibres synthétiques ne sont pas concernées par ce phénomène lorsqu'elles sont souples mais si elles sont très rigides, le problème est le même que pour les fibres métalliques.

Pour les fibres synthétiques souples, on peut utiliser des fibres dont la longueur est de l'ordre du diamètre du tuyau, voire un peu plus.

L'incorporation des fibres doit être effectuée avec les granulats (tapis peseur, skip...) ou dans le malaxeur de la centrale (sur chantier ou BPE) à l'aide d'un doseur automatique ou de sacs prédosés.

Le choix des fibres et la spécification de leur teneur minimale dans le béton frais après projection sont proposés par l'entreprise et validés par le maître d'œuvre après analyse des résultats des essais de convenue. Cette teneur sera ensuite contrôlée pendant toute la durée du chantier, juste après projection (analyse du béton frais selon la méthode B de la norme NF EN 14488-7).

La durée de malaxage après introduction des fibres est ajustée lors des essais de convenue.

Le parti pris dans les clauses proposées ci-avant est de spécifier une capacité d'absorption d'énergie. La teneur minimale en fibres est fixée a posteriori en fonction des teneurs mesurées sur des bétons fraîchement projetés ayant atteint les valeurs d'énergie spécifiées.

Si le projet prévoit une justification par le calcul, on peut être amené à intégrer d'autres essais de caractérisation mécanique (mesures de résistance résiduelle selon la norme NF EN 14488-3, du module d'Young...).

Il est possible, et certains prescripteurs le préfèrent, d'imposer dans le CCTP une teneur minimale en fibres.

Le dosage usuel en fibres avant projection est de l'ordre de :

- 20 à 40 kg/m³ pour les fibres métalliques (dosage courant : 25 kg/m³),
- 5 à 8 kg/m³ pour les fibres macrosynthétiques.

Les pertes en fibres en cours de projection par voie mouillée sont de l'ordre de 10 à 20 % pour les fibres métalliques (probablement du même ordre de grandeur pour les fibres polymères).

MISE EN ŒUVRE DU BÉTON PROJÉTÉ

5.1 CONDITIONS PARTICULIÈRES D'EXÉCUTION

5.1.1 Contraintes de site

À décrire pour chaque chantier, en particulier s'il y a lieu :

- les contraintes liées à l'installation de chantier : accès, surfaces, drainages, clôtures, zones de dépôt...,
- l'existence d'une distance maximale et liaison (visuelle, sonore, téléphonique ou radio) entre la machine de projection et le support,
- les exigences en matière de production de poussières,
- les exigences liées au bruit,
- les sujétions liées aux branchements d'eau et d'électricité,
- les dispositions en matière de centrale à béton de chantier ou extérieure (BPE) et sa distance au chantier, la mise en place d'éventuelles déviations de circulation rallongeant cette distance,
- les contraintes d'installation de lavage des bétonnières portées (ou «toupies») et gestion des déchets correspondants,
- les exigences en matière d'évacuation de déchets,

- les contraintes de traitement des arrivées d'eau pendant les travaux,
- les contraintes de traitement des eaux rejetées par le chantier,
- les sujétions liées aux réseaux existants, éclairage, ventilation,
- ...

5.1.2 Contraintes d'exécution des travaux

À décrire pour chaque chantier, en particulier s'il y a lieu :

- les contraintes horaires,
- les exigences de nettoyage du chantier,
- les impératifs de phasage des travaux,
- les contraintes de circulation de chantier,
- les exigences pour le dispositif de ventilation,
- la concomitance de chantiers à proximité,
- ...

5.2 FABRICATION, TRANSPORT ET LIVRAISON DU BÉTON À PROJETER

La fabrication, le transport et la livraison des bétons destinés à la projection par voie mouillée se font conformément à l'article 8 de la norme NF EN 14487-2 complétée par les indications de l'article 2.3 du Fascicule « Mise en œuvre du béton projeté » de l'ASQUAPRO.

Les prescriptions décrites dans l'article 83 du fascicule 65 du CCTG version 2014 s'appliquent.

Pour le béton prêt à l'emploi, les bétons et l'installation de fabrication bénéficient d'une certification émanant d'un organisme certificateur officiel. La marque NF-BPE couvre à la fois la certification des bétons et celle de l'installation de fabrication. De plus, l'installation de fabrication doit respecter les spécifications complémentaires données dans l'annexe B du fascicule 65 du CCTG version 2014.

En cas de fabrication sur site à partir d'une centrale de chantier, l'acceptation de l'unité de production par le maître d'œuvre sera effectuée sur la base des spécifications données dans l'annexe B du fascicule 65 du CCTG version 2014.

Le choix de la centrale à béton est soumis à l'acceptation du maître d'œuvre. Cette acceptation constitue un point d'arrêt. Le délai de transport entre la centrale et le chantier doit être compatible avec la durée pratique d'utilisation du béton.

L'entreprise proposera des dispositions permettant d'éviter la rupture d'approvisionnement en béton. En cas d'utilisation d'une centrale de secours, celle-ci répondra au même niveau de spécification que la centrale principale.

Des dispositions doivent être prises pour limiter la variabilité de la teneur en eau des gravillons (définition d'une valeur maximale de teneur en eau à la réception, gestion de stocks permettant un égouttage préalable, etc.).

La livraison est effectuée sur site par bétonnières portées équipées d'un tambour comportant au moins deux vitesses de rotation, l'une pour l'agitation (2 à 3 tours par minutes), l'autre pour le brassage (de l'ordre de 12 à 15 tours par minute).

Avant chargement, le producteur s'assure, en faisant tourner la bétonnière portée à grande vitesse, que la cuve est bien vidée

et ne contient plus d'eau. Il est interdit d'ajouter de l'eau en cours de transport et avant mise en œuvre.

Avant déchargement, la bétonnière doit tourner à grande vitesse pendant au moins 2 minutes.

Les commandes de l'entreprise doivent se référer à la norme NF EN 206/CN, en contractualisant les clauses relatives aux conditions de préparation, aux contrôles et essais en cours de fabrication, à la commande et à la livraison.

Les bordereaux de pesée doivent être fournis avec le bon de livraison. Un transfert du béton par pompage, entre le point de livraison et la machine à projeter est autorisé sous réserve que la formule nominale soit étudiée en conséquence et que cette démarche soit validée lors des épreuves de convenance.

Dans le cadre des relations entre entreprises et fournisseur de béton, une bonne pratique de fabrication consiste à contrôler la consistance en début de production à la centrale à béton; ce qui ne remplace pas le nécessaire contrôle de la consistance du béton à sa livraison sur chantier.

5.3 MISE EN ŒUVRE

L'organisation de la qualité et la mise en œuvre des bétons doivent respecter les exigences définies par la norme NF EN 13670/CN. Pour l'application de cette norme, la classe d'exécution à retenir est la classe 3.

L'entrepreneur se référera aux recommandations de la norme NF EN 14487 2 et du fascicule «Mise en œuvre» de l'ASQUAPRO, pour les dispositions non contradictoires avec celles définies ci-dessous.

5.3.1 Précautions particulières en fonction de la température

Quelles que soient les conditions climatiques, le béton mis en œuvre doit avoir une température minimale de 15 °C. Pour cela, il est accepté de chauffer à la centrale l'eau et les granulats sous réserve de vérifier que les exigences du CCTP sont satisfaites.

Projection par temps froid

Lorsque la température du support est inférieure à 0 °C, la projection de béton est formellement interdite.

La projection est possible sur un sol congelé, mais elle est très délicate et ne rentre pas dans le cadre strict de ce document. Des précautions particulières sont à prendre au niveau du dimensionnement et de la mise en œuvre (épaisseur «sacrificielle» non prise en compte dans le soutènement, pas d'arrosage avant projection...). Les problématiques d'adhérence au support sont alors particulièrement délicates.

En cas de projection du béton sur support froid (température superficielle du support comprise entre 0 et + 5 °C), l'entrepreneur soumet au maître d'œuvre un système de protection de la zone traitée maintenant la température de l'air dans cette zone au-dessus de 5 °C pendant au moins 10 h après projection.

Si la température de l'air est inférieure à 10 °C, l'entrepreneur positionnera le compresseur à l'intérieur du tunnel ou dans

une enceinte permettant de confiner l'espace autour du compresseur.

Concernant l'activateur, la cuve installée sur le robot et celle de stockage doivent être munies d'un dispositif de chauffage extérieur, de façon à ce que la température de l'activateur soit toujours d'au moins 20 °C au moment de son utilisation.

Les dispositifs utilisant la vapeur ou des serpentins remplis de glycol permettent d'atteindre cet objectif. À l'inverse, les thermoplongeurs sont proscrits.

On conseille d'activer le système de chauffage de l'activateur dès que la température du produit est inférieure à 20 °C, ceci afin de minimiser la quantité d'activateur à ajouter (cette valeur est indicative et doit être ajustée en fonction des recommandations des fournisseurs).

Projection par temps chaud

Le béton mis en œuvre doit avoir une température inférieure à 32 °C.

Lorsque la température du support est supérieure à 32 °C, une attention particulière sera portée à son arrosage.

5.3.2 Conditions d'éclairage

La zone de projection doit faire l'objet d'un éclairage spécifique de forte puissance : minimum 200 lux.

5.3.3 Matériels

Le béton doit être mis en place au moyen d'un robot de projection. Dans le cas des petits espaces, dont l'accès est difficile, l'utilisation d'une machine à projeter munie d'un bras manipulateur est admise.

L'entreprise est responsable de l'approvisionnement des pièces de rechange ou matériels de secours pour que l'installation ne soit pas arrêtée pour cause de panne.

L'alimentation en air est assurée par un compresseur dont le débit sera compatible avec les cadences de projection. Afin de garantir une répartition homogène dans le béton projeté, l'activateur doit être introduit avec l'air, en 2 points, dans un diffuseur situé juste avant la lance de projection.

Les robots équipés de pompe béton à séquence décalée sont à privilégier, car ils évitent efficacement le feuilletage du béton en empêchant la projection d'activateur sans béton entre les changements de piston. De même, pour assurer le dosage de l'activateur, l'utilisation d'une pompe asservie au débit de la machine de projection est recommandée.

5.3.4 Préparation du support

Pour des raisons de sécurité des ouvriers, la projection du soutènement doit être réalisée rapidement après l'abattage et le marinage des matériaux afin d'assurer la stabilité de l'excavation.

Pour cela, en fonction des conditions géologiques, on évitera une longueur de décousu trop importante (cf § 5.3.6).

Pour la même raison, la préparation du support avant projection doit être limitée à :

- une purge : le support doit être stable et exempt de tout élément médiocre ou instable ;
- une humidification est effectuée par arrosage pour éviter l'absorption de l'eau du béton frais et éliminer les poussières et petits éléments instables. Le béton doit être projeté sur une surface humide mais non ruisselante, d'aspect mat. Plusieurs opérations successives d'humidification peuvent être nécessaires en cas de forte chaleur, de forte ventilation ou de support poreux.

À l'inverse, par temps froid, l'humidification du support est proscrite lorsque la température du support est inférieure à 5 °C.

Des précautions particulières sont à prévoir pour éviter le mouillage des terrains gonflants (marnes ou argiles).

La projection du béton de protection immédiate peut être effectuée y compris dans les zones de venues d'eau, en prenant en compte les risques de chute de béton frais. Par la suite, l'entrepreneur prévoit des systèmes d'étanchement (captage, drainage ou colmatage) de façon à pouvoir procéder à un complément de projection sur la zone étanchée.

5.3.5 Certification des opérateurs de projection

Tous les opérateurs de projection doivent être titulaires de la certification ASQUAPRO ou équivalent.

Le niveau de certification exigé est : ...

En fonction des difficultés du chantier et des matériels prévus pour la mise en œuvre (y compris les moyens de secours), les personnels de projection du béton : pilotes de robot (PR) doivent avoir le niveau de certification confirmé (C) ou hautement qualifié (HQ).

Dans le Règlement de Consultation, il est nécessaire d'exiger la remise, dans le mémoire technique de l'entreprise, des certifications d'au moins deux pilotes de robot dont l'un ayant le niveau de certification exigé.

La formation des opérateurs de projection est assurée, sous forme de stages, soit par un organisme de formation, soit par à une entité chargée de la formation au sein d'une entreprise. Ces stages doivent avoir une durée de 4-5 jours et ont lieu directement en entreprise ou dans des centres de formation. L'ASQUAPRO ou l'ACI sont habilités à délivrer des certifications pour la projection de béton. En France, tout au long de l'année, les dates des différentes sessions sont disponibles sur la page «Actualités» du site www.asquapro.com.

5.3.6 Projection

L'entrepreneur se référera à la norme NF EN 14487-2 et au fascicule «Mise en œuvre» de l'ASQUAPRO, y définissant en particulier l'épaisseur maximale des couches, la distance et l'angle de projection, la conduite de la lance pour obtenir une couche d'une densité et d'une épaisseur optimales avec un enrobage complet des éventuelles armatures, un rebond minimal et une bonne adhérence au support.

L'entrepreneur précise, dans ses procédures, le délai maximal entre l'excavation d'une section et la projection du béton (décousu). Ce délai est le plus réduit possible, l'application du béton projeté devant être réalisée le plus tôt possible après la purge.

La projection sera réalisée suivant les règles de l'art rappelées dans le fascicule «Mise en œuvre du béton projeté» disponible sur le site www.asquapro.com. En particulier, le support doit être systématiquement humidifié avant la projection d'une deuxième couche.

5.3.7 Épaisseurs mises en œuvre

Les épaisseurs minimales à mettre en place sont définies dans les profils types de soutènement.

On se référera aux recommandations ASQUAPRO du fascicule «Mise en œuvre» pour les épaisseurs maximales recommandées. L'épaisseur totale de soutènement exigée doit être mise en place dans les délais les plus réduits possibles, en ne dépassant pas 24 h entre couches, pour éviter le feuilletage entre couches. Dans le cas contraire, il est nécessaire d'effectuer une préparation de la surface de reprise selon une procédure soumise à l'agrément du maître d'œuvre.

Il est rappelé que le support doit être systématiquement humidifié avant projection d'une nouvelle couche.

L'épaisseur de béton projeté spécifiée peut requérir l'application de deux couches ou plus afin d'éviter les affaissements et les glissements (en particulier pour les projections en voûte). L'épaisseur de chaque couche dépend des conditions du site (température...) et de la composition du mélange (activateur...).

5.3.8 Cure

Étant donné la mise en place ultérieure d'un revêtement coffré, il est admis de ne pas prendre de précautions particulières pour la cure du béton de soutènement.

Tant que le tunnel n'est pas percé, compte-tenu des conditions environnementales (pas de vent, fort taux d'humidité ambiante), les retours d'expérience montrent qu'il n'y a en général pas lieu de prendre de précautions particulières pour la cure.

5.3.9 Aspect fini

La qualité de l'état final, brut de projection, est à prendre en compte au niveau des procédures de contrôle pour éviter l'endommagement voire le percement de l'étanchéité ultérieure de l'ouvrage par DEG.

En termes de régularité du support en béton projeté, les critères de réception sont alors ceux définis dans la revue TOS 150 de nov.-déc. 1998 :

- Vérification de la géométrie générale (suivant la procédure de l'annexe 1 du TOS 150) :
 - rayon minimum des bosses ou des creux > à 20 cm (tolérance 2 cm)
 - profondeur maximale d'un trou ou cavité < D/2 (tolérance 5 cm), D étant le diamètre du trou
- Vérification de la rugosité (suivant la procédure de l'annexe 2 du TOS 150) :

Valeurs des profondeurs moyennes PM mesurées (en piédroit : PM_p et en voûte : PM_v)	Dimension de la protection inférieure en géotextile pour les bétons sans fibres métalliques
$PM_p \leq 18$ mm $PM_v \leq 25$ mm	Protection type (600 g/m ²)
$18 \text{ mm} < PM_p < 25$ mm $25 \text{ mm} < PM_v < 30$ mm	Protection type + 200 g/m ² (800 g/m ²)
$PM_p > 25$ mm $PM_v > 30$ mm	Reprise du support par l'entreprise de génie civil avant nouvelle vérification de la rugosité

Le retour d'expérience montre que la gamme 600 g/m² n'est quasiment plus utilisée et est remplacée par la gamme 700 g/m².

Les caractéristiques physico-mécaniques à respecter pour le géotextile de protection inférieure (résistance à la traction, au poinçonnement statique...) sont spécifiées dans le TOS 159 de mai-juin 2000.

Les recommandations AFTES sur les protections inférieures des DEG par géotextiles sont en cours d'actualisation.

Conformément au TOS 215 de sept-oct 2009, en cas d'utilisation de fibres métalliques dans le béton de soutènement, la protection de la géomembrane doit être assurée par la mise en place d'un géotextile à grammage élevé (1 200 g/m²) et non par projection d'une couche de béton projeté supplémentaire.

À noter : Suivant les précautions d'usage spécifiées dans les avis d'experts AFTES, il est possible de projeter un système d'étanchéité projetée confinée (SEPC) directement sur un béton de soutènement, même renforcé de fibres métalliques.

5.3.10 Réception du béton projeté

Après la fin de la projection mais avant le départ des matériels nécessaires à la reprise de projection, une réception contradictoire est effectuée par le maître d'œuvre ou son représentant et en présence de l'entreprise mandataire et de l'étancheur, pour s'assurer que :

- toutes les surfaces prévues ont été traitées;
- les surfaces traitées ne présentent aucun signe de décollement ou de fissuration anormale;
- la géométrie et la rugosité imposées au marché sont respectées;
- si besoin, le nettoyage des parties voisines des zones traitées (radier, caniveaux, réseaux...) et le ramassage des pertes en béton ont été correctement effectués.

Toutes les non-conformités listées ci-dessus doivent faire l'objet d'une procédure de traitement.

À noter : la géométrie de l'excavation (usuellement dénommée ligne S) et du béton (épaisseur et planéité) sont à vérifier; il est fortement recommandé de réaliser les reprises pour la mise en conformité du support au fur et à mesure de l'avancement du creusement.

6

ÉPREUVES D'ÉTUDE, DE CONVENANCE ET DE CONTRÔLE

6.1 GÉNÉRALITÉS

Les épreuves d'étude, de convenance et de contrôle intérieur sont réalisées sous la responsabilité de l'entreprise. Elles doivent respecter les exigences définies dans la norme NF EN 13670/CN.

Tous les bétons destinés à la projection sont soumis à des épreuves respectant les spécifications des articles 8.2.1 (épreuves d'étude) et 8.2.3 (épreuves de convenance) du fascicule 65 du CCTG version 2014. En complément des épreuves de convenance définies dans ce fascicule, ces bétons sont également soumis à des essais de projection.

Les épreuves de contrôle sont réalisées en respectant les spécifications du paragraphe 6.5 du présent document.

La notion de famille définie dans la norme NF EN 206/CN n'est pas retenue pour ce qui concerne les épreuves d'étude, de convenance et de contrôle.

La conformité des performances mécaniques du **béton livré** (avant projection) est statuée sur la base **des essais à 28 jours**.

La conformité des performances mécaniques du **béton projeté** est statuée sur la base **des essais à 7 et 28 jours**. Les spécifications à 28 jours sont fixées par le présent CCTP. Les spécifications à 7 jours sont définies par le maître d'œuvre après examen des résultats des épreuves de convenance.

Le présent document ne prend pas en compte d'exigence de durabilité vis-à-vis du gel-dégel; on se référera si besoin aux nouvelles recommandations du GT6 de l'AFTES relatives aux bétons projetés par voie mouillée pour le revêtement des ouvrages souterrains (à paraître).

6.2 POINTS D'ARRÊT ET POINTS CRITIQUES

La liste des points d'arrêt relative aux bétons projetés est donnée ci-dessous :

Soutènement	Points d'arrêt
Projection de béton par voie mouillée	<ul style="list-style-type: none">- Certification en cours de validité des portelances ou pilotes de robot- Réception de(s) centrale(s) à béton- Validation de l'épreuve d'études- Autorisation de réaliser les épreuves de convenance et acceptation du programme de convenance- Validation de l'épreuve de convenance- Réception du béton projeté

Il est rappelé que l'acceptation par le maître d'œuvre des valeurs de résistance en compression et de capacité d'absorption d'énergie à 7 jours est comprise dans la validation de l'épreuve de convenance.

La liste des points critiques est présentée par le titulaire dans le document d'organisation générale du Plan Qualité. Elle est soumise à l'approbation du maître d'œuvre.

Les délais de préavis et de levée des points d'arrêt et des points critiques sont indiqués dans le Plan Qualité de l'entreprise pendant la période de préparation, sur la base du Schéma Directeur de la Qualité, du CCTP et du Plan de Contrôle élaborés par le maître d'œuvre.

Ces délais contractuels sont également fixés au CCAP.

6.3 ÉPREUVE D'ÉTUDE (AVANT PROJECTION)

L'étude de composition des bétons incombe à l'entrepreneur dans le cadre de son Plan Qualité.

Il est admis de ne pas projeter le béton lors de l'épreuve d'étude, pendant l'effet de la projection et celui de

l'activateur sur les performances attendues doivent être examinés (compatibilité...).

Les épreuves d'étude permettent :

- d'établir les formules nominales et d'étudier les formules dérivées ;
- de vérifier que les résultats des essais de consistance sur toutes les formules sont compris dans la fourchette spécifiée par l'entreprise sur toute la durée pratique d'utilisation (T_m) de ces formules par des mesures régulières de la consistance du béton frais, suivant la norme NF EN 12350-2. Cette durée, visée par l'entreprise, doit tenir compte du temps de transport de la centrale à béton au poste de projection, du temps nécessaire à la projection et du cycle d'avancement du creusement de l'excavation ;
- de vérifier l'obtention des caractéristiques spécifiées, notamment la résistance à la compression à 28 jours (sur éprouvettes normalisées...);
- d'obtenir des valeurs de résistance en compression à 7 jours, à titre informatif.

La durée pratique d'utilisation T_m est le plus souvent estimée à 90 min, voire 120 min ou plus.

6.3.1 Références probantes

Conformément aux spécifications de l'article 8.2.1.1 du fascicule 65 du CCTG version 2014, les épreuves d'études ne sont pas nécessaires en cas d'utilisation d'une formule de béton présentant des références probantes.

Le béton est considéré comme disposant de références probantes si les deux conditions suivantes sont remplies :

- le béton a déjà été fabriqué et mis en œuvre dans des conditions équivalentes à celles de la fourniture considérée dans un délai inférieur à 2 ans ;
- les n résultats ($n \geq 12$) de résistance à la compression à 28 jours obtenus dans le cadre des épreuves de contrôle des fournitures de référence ayant donné lieu à une mesure de consistance située dans la fourchette requise vérifient les deux conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \bullet f_c &\geq f_{ck} + K(n) \times S \\ \bullet f_c &\geq f_{ck} + 6 \text{ MPa} \end{aligned}$$

avec

- f_c est la moyenne arithmétique des n résultats à 28 jours,
- S est l'estimateur de l'écart type de la distribution des résistances,
- f_{ck} est la résistance caractéristique à la compression spécifiée à 28 jours,
- n correspond au nombre de prélèvements donnant lieu chacun à l'exécution d'au moins un essai de consistance et à la confection d'au moins un lot de trois éprouvettes pour essai de résistance à la compression à 28 jours,

- $K(n)$ est un coefficient, fonction du nombre de résultats selon le tableau ci-dessous :

n	12	40	75	100	200
$K(n)$	2,00	2,00	1,90	1,86	1,80

Une justification du respect des exigences complémentaires éventuellement définies au marché est également à prévoir.

6.3.2 Programme de l'épreuve d'étude

Au préalable, une caractérisation des granulats utilisés pour l'étude est à réaliser (granulométrie, propreté, absorption et masse volumique...).

L'épreuve d'étude, exécutée en laboratoire sous la responsabilité de l'entrepreneur, consiste à fabriquer :

- 1 gâchée répondant à la formule nominale,
- 2 gâchées dérivées de la formule nominale par une modification de la quantité d'eau de gâchage, respectivement de plus et de moins 10 l/m³,
- 2 gâchées dérivées de la formule nominale par la modification de la quantité de ciment, respectivement de plus et de moins 20 kg de ciment par mètre cube de béton,
- 2 gâchées dérivées de la formule nominale par la modification du rapport entre le poids de sable et le poids total des granulats, respectivement de plus et de moins 10 %.

En cas d'utilisation du concept de liant équivalent au sens de la norme NF EN 206/CN, l'attention de l'entrepreneur est attirée sur l'utilité d'étudier le durcissement au jeune âge, par exemple au moyen de l'aiguille Vicat (NF EN 196-3+A1), sur la formule (ciment + eau + additions + activateur) par comparaison avec une formule de référence ayant un dosage minimum de 400 kg/m³ en ciment CEM I.

La gâchée nominale donne lieu à un prélèvement à partir duquel sont effectués au minimum :

- la détermination de la durée pratique d'utilisation du béton (T_m) par la mesure régulière de la température et de la consistance (essais d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2) ;
- un essai de détermination de la masse volumique du béton frais à T_0 et à T_m (selon la norme NF EN 12350-6) ;
- la confection de 3 éprouvettes (15 × 30 ou 16 × 32 cm) à T_m pour essais de résistance à la compression du béton à 28 jours.

Les dimensions des éprouvettes prescrites ci-dessus sont les plus couramment utilisées. D'autres tailles d'éprouvettes sont possibles si conformes à la NF EN 12390-1.

Il est recommandé d'ajouter des mesures de résistance à d'autres échéances (ex : 3 h, 12 h, 2 ou 7 jours), selon les caractéristiques du chantier.

Suivant les chantiers, il peut être nécessaire de mettre au point une formule «hiver» et une formule «été».

Les **gâchées dérivées** donnent lieu à un prélèvement à partir duquel sont effectués :

- un essai de consistance du béton frais au cône d'Abrams (de T_0 à T_m) ;
- un essai de détermination de la masse volumique du béton à T_0 (selon la norme NF EN 12350 6) ;
- la confection de 3 éprouvettes (15 × 30 ou 16 × 32) à T_m pour essai de résistance à la compression du béton à 28 jours.

L'épreuve d'étude est **probante** si les critères de conformité suivants sont respectés (identiques au fascicule 65 du CCTG version 2014) :

- les résultats des essais de consistance effectués sur toutes les formules sont compris dans la fourchette spécifiée par l'entreprise ;
- les résultats des essais de résistances à la compression à 28 jours satisfont les exigences suivantes :

Pour la nominale : $f_{CE} \geq f_{Ck} + (C_E - C_{min})$ et $f_{CE} \geq f_{Ck} + 2 \cdot S$

Pour les dérivées : dans la fourchette $f_{CE} \pm 0,15 \cdot f_{CE}$

avec :

- f_{CE} : moyenne des mesures en compression des 3 éprouvettes à 28 jours
- f_{Ck} : résistance caractéristique spécifiée à 28 jours

- C_E : résistance à la compression du ciment mesurée par le laboratoire à 28 jours
- C_{min} : valeur minimale de la résistance à la compression à 28 jours pouvant être respectée pour le ciment choisi, observée pendant une durée significative au cours de l'autocontrôle du fournisseur
- S : écart type prévisionnel de la distribution des résistances (pris forfaitairement au minimum égale à 3 MPa).

Les épreuves d'étude, pour chacun des bétons étudiés, font l'objet d'un rapport à soumettre à l'agrément du maître d'œuvre et comportant notamment :

- un chapitre indiquant avec précision l'origine de chacun des constituants du béton (ciment, granulats, eau, adjuvants, additions éventuels, activateur prévu) et regroupant toutes les informations demandées à l'appui de la proposition d'agrément de ces constituants. C'est dans ce chapitre que l'entrepreneur indique les valeurs minimales et maximales de l'équivalent de sable et les fuseaux de tolérance de la granulométrie des différents granulats qu'il propose, ainsi que la formule nominale de composition de chacun des bétons ;
- un chapitre indiquant avec précision les caractéristiques du matériel utilisé pour la fabrication du béton, et les tolérances qu'elles permettent sur le dosage de constituants ;
- un chapitre rassemblant les résultats de l'épreuve d'étude et comportant notamment le rappel de tous les paramètres des essais, la description du déroulement des essais et des paramètres influant sur ce déroulement (température ambiante...), les résultats obtenus, et les recommandations de l'Entrepreneur et de son laboratoire.

6.4 ÉPREUVE DE CONVENANCE

6.4.1 Généralités

L'épreuve de convenance doit permettre de tester toute la chaîne de mise en œuvre du béton (fabrication, transport, projection). Elle doit être réalisée dans les conditions réelles de déroulement du chantier (mêmes matériels, matériaux, personnels).

L'épreuve de convenance consiste à fabriquer en centrale une gâchée (pour les bétons disposant de références probantes) ou trois gâchées (pour les bétons ne disposant de références probantes) répondant à la formule nominale validée à l'issue de l'épreuve d'étude et à contrôler ses caractéristiques avant et après projection. L'épreuve de convenance est réalisée par l'entrepreneur sous sa responsabilité. Elle permet de vérifier que le béton satisfait aux exigences du marché. Son acceptation constitue un point d'arrêt.

Les formules de béton projeté répondant aux exigences énoncées dans le CCTP doivent être proposées au moins 2 semaines avant la date prévue pour la réalisation de l'épreuve de convenance.

Le matériel proposé par l'entreprise ainsi que les certificats des opérateurs de projection doivent être soumis à l'acceptation du maître d'œuvre au moins 2 semaines avant la date prévue pour le démarrage des épreuves de convenance.

L'épreuve de convenance doit être réalisée en prévoyant un délai suffisant pour disposer de l'ensemble des résultats avant la levée du Point d'Arrêt. Si les résultats à 7 jours (résistance en compression et absorption d'énergie) sont inférieurs à 80 % de la valeur spécifiée à 28 jours, l'entreprise procédera à une nouvelle épreuve de convenance sans attendre 28 jours. Si les résultats à 28 jours sont inférieurs aux valeurs spécifiées, une nouvelle épreuve de convenance sera organisée. Tous

les frais afférents sont à la charge de l'entreprise, y compris l'immobilisation des matériels.

L'épreuve de convenance doit être réalisée AU MINIMUM 7 semaines avant la date prévue pour la première projection.

Les essais portent notamment sur les paramètres suivants :

- les ajustements de la formule nominale qui ne peuvent être réalisés au cours des épreuves d'étude généralement confiées à des laboratoires n'ayant ni le matériel de projection prévu pour le chantier, ni le personnel qualifié pour l'utiliser,
- le fonctionnement des installations de malaxage, de refoulement et de projection du béton,
- l'étalonnage de la pompe d'introduction de l'activateur et le fonctionnement du système d'asservissement,
- la procédure d'exécution relative à la projection du béton (préparation du support, respect des épaisseurs, délai entre couches...),
- la vérification des caractéristiques mécaniques à 28 jours et obtention des valeurs cibles à 7 jours servant de référence pour les contrôles ultérieurs sur chantier,
- le dosage et choix des fibres (le cas échéant),
- la technicité des projeteurs proposés par l'entrepreneur à l'agrément du maître d'œuvre.

L'entrepreneur fait réaliser les essais mécaniques liés aux épreuves de convenance par un laboratoire agréé par le maître d'œuvre. Le contrôle extérieur du maître d'œuvre pourra réaliser les mêmes essais en parallèle de façon à vérifier la cohérence de leurs résultats.

Le laboratoire du contrôle extérieur doit également assister aux épreuves de convenance.

La fourniture du béton et des caisses pour la réalisation de l'ensemble des essais est à la charge de l'entrepreneur.

Pendant le délai de stockage des caisses d'échantillons, l'entrepreneur est tenu d'assurer toutes les protections nécessaires à leur bonne conservation dans les conditions voisines de celles auxquelles est soumis le béton projeté de soutènement (protection contre les souillures, température, hygrométrie, ventilation...). Le transport doit être effectué :

- la veille du jour d'essai pour les échéances à 7 jours,
- 5 jours avant le jour d'essai pour les échéances à 28 jours.

Pendant le transport, les caisses d'échantillon doivent être mises à l'abri des chocs.

L'entrepreneur est autorisé à scinder l'épreuve de convenance de projection en plusieurs phases, avant le démarrage du chantier de projection. Par exemple :

- une première phase, à l'extérieur du tunnel, pour vérifier les matériels et l'obtention des résistances mécaniques du béton projeté,
- une seconde phase, en tunnel, pour vérifier la projection du béton (aptitude de l'opérateur de projection,

régularisation du relief, aspect de surface, respect des épaisseurs, délai entre couches...).

Lorsque le temps de transport est variable, il faut prévoir des essais de projection après un temps d'attente en bétonnière portée correspondant à la durée pratique d'utilisation du béton (T_m) afin de vérifier le maintien de la « projectabilité » et de la « maniabilité » du béton.

6.4.2 Programme de l'épreuve de convenance

Avant projection, l'épreuve de convenance est menée selon les dispositions prévues par le fascicule 65 du CCTG version 2014.

Pour chaque béton désigné au marché, l'entrepreneur doit fournir pour effectuer un contrôle de conformité aux spécifications :

- une gâchée répondant à la formule nominale pour les bétons disposant de références probantes,
- un minimum de 3 gâchées correspondant à la formule nominale pour les bétons ne disposant pas de références probantes.

Les essais réalisés et les critères de conformité sont les mêmes que ceux prévus pour l'étude de la formule nominale (cf. §6.3.2) : consistance au cône d'Abrams, masse volumique et résistance en compression à 28 jours.

Une détermination du rendement volumique doit être effectuée. Elle doit permettre de vérifier l'inégalité suivante :

$$0,975 < \frac{\text{masse volumique théorique}}{\text{masse volumique réelle}} < 1,025$$

L'épreuve de convenance du béton avant projection est à réaliser dans toutes les centrales (y compris la centrale de secours le cas échéant), et pour toutes les formules de béton.

Après projection, les contrôles portent sur :

- le contrôle qualitatif de la mise en œuvre du béton projeté sur la paroi (préparation du support, régularisation du relief, homogénéité du béton, obtention de l'état de surface requis pour la pose de l'étanchéité...),
- le prélèvement de carottes pour essais de résistances mécaniques à la compression du béton à 7 et 28 jours,
- l'évolution du durcissement au jeune âge,
- le prélèvement de carottes pour détermination de l'adhérence entre couches à 28 jours,
- la détermination du dosage en fibres sur béton fraîchement projeté,
- la détermination de la capacité d'absorption d'énergie du béton projeté fibré à 7 et 28 jours pour une déformation de 25 mm.

L'épreuve de convenance de projection est à réaliser sur site, pour toutes les formules de béton, pour chaque type de robot utilisé.

Compte tenu des débits de projection lors de l'utilisation d'un robot, le remplissage des caisses d'essai peut s'avérer délicat et peu représentatif des réglages de projection sur la paroi. Dans ce cas (hormis pour les dalles de mesure de capacité d'absorption d'énergie), le MOE peut demander le prélèvement d'échantillons par carottage en place.

Lors du carottage, l'état des carottes doit être vérifié pour détecter un éventuel feuilletage dû à des variations de dosage de l'activateur (problème lié au matériel de projection) ou à des défauts d'adhérence entre couches.

6.4.3 Consistance des essais de convenance (après projection) et critère de conformité

Type d'essai	Procédure d'essai	Critères de conformité
<u>Résistance en compression à 7 et 28 jours</u>	<p>La mesure de la résistance en compression est réalisée selon la norme NF EN 12504-1 sur des carottes de diamètre 60 mm et d'éclatement 2 prélevées dans des caisses ajourées (pour ne pas piéger les pertes) confectionnées selon la norme NF EN 14488-1.</p> <p>Une caisse est réalisée par échéance de mesure, permettant la confection de 5 carottes en son centre.</p> <p><i>Il est rappelé que les exigences de montée en résistance du béton au jeune âge sont de la responsabilité de l'entreprise (cf § 3.3.3). Il est fortement recommandé que des mesures de résistance à d'autres échéances (3 h, 6 h...) soient réalisées.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – La résistance moyenne en compression à 7 jours sert de référence pour les essais de contrôle ultérieurs. Cette valeur moyenne à 7 jours doit être égale à au moins 80 % de la valeur spécifiée à 28 jours. – La résistance moyenne à la compression à 28 jours doit être supérieure ou égale à celle spécifiée au CCTP. <p>Pour chaque échéance, la valeur moyenne est calculée sur 5 carottes en éliminant au plus 2 valeurs extrêmes (écartées de $\pm 20\%$ par rapport à la moyenne arithmétique des résultats). On rappelle que les valeurs doivent être corrigées pour les ramener à des résistances équivalentes sur carottes cylindriques 15 x 30 ou 16 x 32 (cf § 3.3.1).</p>
<u>Évolution du durcissement au jeune âge</u>	<p>Elle est évaluée sur 10 mesures suivant la norme NF EN 14488-2 (enfoncement d'un clou enfoncé par percussion). Cet essai est réalisé dans une caisse ajourée (pour ne pas piéger les pertes) confectionnée selon la norme NF EN 14488-1.</p>	<p>Pas de critère de conformité pour l'épreuve de convenance.</p> <p>Pour les contrôles ultérieurs, l'entrepreneur doit établir une courbe de référence caractérisant le durcissement du béton projeté au jeune âge et définir la valeur minimale acceptable permettant la présence de personnels en dessous de la zone soutenue</p>
<u>Adhérence entre couches à 28 jours</u>	<p>L'essai est à réaliser selon la norme NF EN 14488-4+A1 sur des carottes d'éclatement compris entre 1,5 et 2,0 après préparation.</p> <p>Ces carottes sont prélevées selon la norme NF EN 12504-1 dans une caisse ajourée (pour ne pas piéger les pertes) de dimension 60 x 60 x 15 cm confectionnée selon la norme NF EN 14488-1.</p> <p>La caisse doit être remplie par projection de béton en 2 couches et permettre le prélèvement de 5 carottes. Le délai entre la projection des 2 couches doit être au minimum de 1 heure.</p>	<p>L'adhérence moyenne à 28 jours entre couches de béton projeté doit être supérieure à la valeur spécifiée dans le présent CCTP.</p> <p>Cette valeur moyenne est calculée sur 5 carottes en éliminant au plus 2 valeurs extrêmes (écartées de $\pm 20\%$ par rapport à la moyenne arithmétique des résultats).</p>

<p><u>Dosage en fibres (pour les bétons fibrés)</u></p>	<p>La teneur en fibres est mesurée suivant la méthode B de la norme NF EN 14488-7, en dérogeant sur le poids de l'échantillon prélevé (minimum de 2,5 kg).</p> <p>3 prélèvements sont effectués directement sur support vertical immédiatement après la projection du béton.</p> <p><i>À ce jour, les contrats ne spécifient généralement pas de contrôles en plafond. Avant d'imposer ce type de contrôle dans un CCTP, le groupe de rédaction se propose d'organiser des premiers essais comparatifs entre paroi verticale et plafond.</i></p>	<p>Pour l'épreuve de convenance, pas de critère de conformité.</p> <p>La valeur moyenne obtenue sur les 3 prélèvements sert de référence pour les essais de contrôles ultérieurs.</p>
<p><u>Capacité d'absorption d'énergie (pour les bétons fibrés) à 7 et 28 jours</u></p>	<p>L'essai est réalisé selon la norme NF EN 14488-5 sur des dalles 60 × 60 × 10 cm (4 dalles mesurées à 7 jours et 4 dalles à 28 jours).</p> <p>Par dérogation aux normes NF EN 14488-1 et NF EN 14488-5, ces dalles sont réalisées par projection directement dans des caisses de dimensions 60 × 60 × 10 cm. La surface est tirée à la règle et non retaillée ultérieurement.</p> <p>À chaque échéance, l'essai est à réaliser sur 3 dalles, la 4^e étant utilisée comme dalle de secours. En cas d'obtention d'un résultat aberrant (valeur ou courbe décrivant le comportement), le résultat correspondant sera invalidé et un nouvel essai sera réalisé sur la dalle de secours pour s'assurer d'avoir au moins 3 valeurs. La 4^e dalle, même non utilisée, doit être stockée comme échantillon conservatoire (accord du MOE nécessaire avant destruction).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La capacité moyenne d'absorption d'énergie à 7 jours sert de référence pour les essais de contrôles ultérieurs. Sur chacune des 3 dalles à 7 jours, la valeur obtenue doit être égale à au moins 80 % de la valeur spécifiée à 28 jours. • Sur chacune des 3 dalles à 28 jours, aucune valeur ne doit être inférieure à l'énergie spécifiée à 28 jours. <p>Pour chaque échéance, la valeur moyenne est calculée sur 3 dalles.</p> <p>Les autres critères de conformité pour les 2 échéances sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • respect strict de l'épaisseur des dalles (10,0-10,5 cm) ; • les dalles doivent rester entières après l'essai ; • les rapports d'essais doivent comporter, en plus des exigences habituelles, les photos des faces inférieures de chaque dalle après essai, après une éventuelle pulvérisation d'eau pour mieux mettre en évidence la multi-fissuration ; • afin de s'assurer de la qualité du béton fibré utilisé, les courbes charge-flèche doivent se rapprocher du faciès type présenté dans le fascicule technique ASQUAPRO « Utilisation des fibres pour le renforcement des bétons projetés pour le soutènement « provisoire » des tunnels » ou dans la norme NF EN 14488-5. Les conditions suivantes sont à prendre en compte pour l'analyse de chaque courbe : <ul style="list-style-type: none"> ▪ avant fissuration, la charge maximale de la zone élastique (Fel-max) doit correspondre à une valeur de déformation inférieure à 2 mm ; ▪ après fissuration, la charge minimale jusqu'à une déformation de 5 mm, doit être supérieure à 70 % de Fel-max (limite élastique). Dans le cas où cette dernière condition ne serait pas atteinte, la validation du résultat d'essai doit être confiée à un laboratoire expert dans l'analyse de ce type d'essais.

Essais comparatifs :

Les deux laboratoires, chargés respectivement des contrôles externes et extérieurs, réaliseront des essais croisés pour comparaison des résultats. Au minimum, seront ainsi réalisées, pour au moins une échéance, une détermination de la capacité d'absorption d'énergie (confection de 4 caisses) et une détermination de la résistance en compression (confection d'une caisse).

L'épreuve de convenance est **probante** si :

- les résultats des différents essais avant et après projection (épaisseurs, résistance en compression aux échéances définies au marché, adhérence entre couches, et en cas

d'utilisation de fibres, la capacité d'absorption d'énergie) sont conformes aux spécifications du CCTP ;

- si l'aptitude du projeteur à la projection du béton testé, avec les matériels de chantier, a été vérifiée. Le projeteur participant à l'épreuve de convenance doit être titulaire de la qualification exigée ASQUAPRO ou équivalent.

Si les contrôles de conformité ne satisfont pas aux exigences contractuelles, il appartient à l'entrepreneur de procéder aux adaptations nécessaires (formule des bétons, installations, méthodes de mise en œuvre), et d'effectuer une nouvelle épreuve de convenance, éventuellement simplifiée, en accord avec le maître d'œuvre. L'entrepreneur n'est pas admis à présenter quelque réclamation que ce soit concernant

l'immobilisation de son matériel et de son personnel jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants.

Les épreuves de convenance font l'objet d'un rapport à soumettre à l'agrément du maître d'œuvre et comportant notamment :

- un chapitre rappelant avec précision la formule nominale de béton utilisée ;
- un chapitre indiquant avec précision les caractéristiques des matériels utilisés (malaxeur, robot de projection...), la certification des opérateurs de projection ;

- un chapitre rassemblant les résultats de l'épreuve d'étude et comportant notamment le rappel de tous les paramètres des essais, la description du déroulement des essais et des paramètres influant (température ambiante...), les résultats obtenus (performances mécaniques avant et après projection et en particulier les valeurs à 7 jours de résistance en compression et de capacité d'absorption d'énergie, choix et dosage des fibres et de l'activateur, la vérification des exigences de montée en résistance du béton projeté...), et les recommandations de l'Entrepreneur et de son laboratoire.

6.5 CONTRÔLE INTÉRIEUR PENDANT LE CHANTIER

6.5.1 Généralités

Afin de ne pas retarder l'avancement du chantier, une éventuelle non-conformité des résultats des essais mécaniques sur béton projeté **relevant du contrôle intérieur pourra être déclarée sur la base des essais à 7 jours.**

Les contrôles intérieurs pendant le chantier sont réalisés par l'entreprise elle-même (contrôle interne) ou par un laboratoire agréé de son choix (contrôle externe). Les contrôles de performance mécanique du béton projeté sont réalisés de la même manière que lors de l'épreuve de convenance.

Les valeurs cibles sont celles définies dans le tableau des spécifications du chapitre 3.1 (résistance en compression, capacité d'absorption d'énergie et adhérence entre couches à 28 jours) **ou à l'issue des épreuves de convenance** (durcissement au jeune âge, dosage en fibres, résistance et absorption d'énergie à 7 jours...).

Les résultats de ces mesures doivent être remis à la maîtrise d'œuvre au plus tard une semaine après la réalisation des mesures, qui les fait vérifier par son contrôle extérieur et qui se réserve le droit de faire refaire des mesures in situ en cas de litige.

6.5.2 Essais sur chantier et critères de conformité

Pendant le délai de stockage des caisses d'échantillons, l'entrepreneur est tenu d'assurer toutes les protections nécessaires à leur bonne conservation (température, cure, protection contre les souillures...).

– **Avant projection**, la consistance du béton est contrôlée :

On utilise la mesure d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2. La consistance mesurée est à comparer

aux valeurs cibles obtenues en convenance en tenant compte des incertitudes d'essai définies dans la norme NF EN 206/CN.

Il est rappelé que la mesure de la résistance à la compression à 28 jours du béton livré sur chantier est de la responsabilité de l'entreprise.

– **Après projection**, les contrôles portent sur :

Type d'essai	Procédure d'essai	Critères de conformité
Résistance en compression à 7 et 28 jours	La mesure de la résistance en compression est réalisée selon la norme NF EN 12504-1 sur des carottes de diamètre 60 mm et d'éclatement 2 prélevées dans des caisses ajourées (pour ne pas piéger les pertes) confectionnées selon la norme NF EN 14488-1. Une caisse est réalisée par échéance de mesure, permettant la confection de 5 carottes en son centre.	– La résistance moyenne à la compression à 7 jours doit être égale à au moins 90 % de la valeur définie à l'issue de l'épreuve de convenance. – La résistance moyenne à la compression à 28 jours doit être supérieure ou égale à celle spécifiée au CCTP. Pour chaque échéance, la valeur moyenne est calculée sur 5 carottes en éliminant au plus 2 valeurs extrêmes (écartées de $\pm 20\%$ par rapport à la moyenne arithmétique des résultats). On rappelle que les valeurs doivent être corrigées pour les ramener à des résistances équivalentes sur carottes cylindriques 15 x 30 ou 16 x 32.

<u>Évolution du durcissement au jeune âge</u>	Elle est évaluée sur 10 mesures suivant la norme NF EN 14488-2. Cet essai est réalisé en piédroit.	L'entrepreneur doit vérifier, à partir de la courbe de référence définie à l'issue de l'épreuve de convenue, l'obtention de la valeur minimale acceptable permettant la présence de personnels en dessous de la zone soutenue.
<u>Adhérence entre couches à 28 jours (le cas échéant)</u>	Cet essai est à réaliser en cas de constat de stratification sur les carottes destinées à la réalisation des essais de compression. L'essai est réalisé selon les mêmes modalités que pour l'épreuve de convenue	L'adhérence moyenne à 28 jours entre couches de béton projeté doit être supérieure à la valeur spécifiée dans le présent CCTP.
<u>Dosage en fibres (pour les bétons fibrés)</u>	La teneur en fibres est mesurée suivant la méthode B de la norme NF EN 1448-7, en dérogeant sur le poids de l'échantillon prélevé (minimum de 2,5 kg). 3 prélèvements sont effectués directement sur le support immédiatement après la projection du béton	La teneur en fibres doit être d'au moins de 90 % de la valeur de référence définie à l'issue des épreuves de convenues.
<u>Capacité d'absorption d'énergie (pour les bétons fibrés) à 7 et 28 jours</u>	L'essai est réalisé selon la norme NF EN 14488-5 sur des dalles 60 × 60 × 10 cm (4 dalles à 7 jours et 4 caisses à 28 jours). Par dérogation aux normes NF EN 14488-1 et NF EN 14488-5, ces dalles sont réalisées par projection directement dans des caisses de dimensions 60 × 60 × 10 cm. La surface est tirée à la règle et non retaillée ultérieurement. À chaque échéance, l'essai est à réaliser sur 3 dalles, la 4 ^e étant utilisée comme dalle de secours et échantillon conservatoire. En cas d'obtention d'un résultat aberrant (valeur ou courbe décrivant le comportement), le résultat correspondant sera invalidé et un nouvel essai sera réalisé sur la dalle de secours pour s'assurer d'avoir au moins 3 valeurs. En parallèle, une détermination de la teneur en fibres devra être réalisée sur le corps d'épreuve incriminé. <i>À ce jour, on ne sait réaliser ce contrôle que pour les fibres métalliques (par concassage).</i>	<ul style="list-style-type: none"> • La valeur obtenue à 7 jours sur chacune des 3 dalles doit être égale à au moins 90 % de la valeur définie à l'issue de l'épreuve de convenue. • Aucune valeur obtenue à 28 jours sur chacune des 3 dalles ne doit être inférieure à l'énergie spécifiée à 28 jours. <p>Les autres critères de conformité définies en convenue restent valables (épaisseur des dalles, multi-fissuration, analyse des courbes).</p>
<u>Contrôle de l'épaisseur de la couche de béton projeté durci</u>	Le contrôle de l'épaisseur du béton projeté est réalisé suivant la norme NF EN 14488-6 par forage à la perceuse à percussions ou à l'aide d'un carottier, à raison de 5 valeurs par pas d'avancement, à répartir sur la développée de la voûte. Pour les profils cintrés, un contrôle visuel peut suffire, à chaque pas d'avancement. Au front de taille, le cas échéant les modalités de contrôle d'épaisseur sont de la responsabilité de l'entreprise	Aucune valeur ne doit être inférieure aux valeurs spécifiées dans la définition des profils de soutènement. <i>Les bétons projetés sont rémunérés suivant les profils types de soutènement définis au CCTP et les règles du bordereau des prix. Cependant, il est essentiel de vérifier que les épaisseurs minimales ont été respectées pour que la couche de béton projeté joue son rôle de soutènement.</i> <i>Pour cela, un relevé profilométrique reste possible, mais il n'est généralement utilisé que pour la vérification du gabarit et des problématiques de convergence</i>
<u>Contrôle de l'aspect fini du béton projeté</u>	La procédure de contrôle est définie au § 5.3.9 du présent CCTP.	Les critères de réception du support après projection sont définis au § 5.3.9 du présent CCTP.

6.5.3 Fréquence des contrôles intérieurs pendant le chantier

La fréquence des contrôles intérieurs sur chantier est contractualisée dans le Plan Qualité de l'entreprise.

L'ouvrage soutenu par béton projeté est de catégorie d'inspection ...

Pour le contrôle de conformité du béton projeté, la norme NF EN 14487-1 définit des catégories d'inspection traduisant les exigences de durabilité de l'ouvrage et les risques structurels potentiels (cf. tableau A3). Puis, en fonction de cette catégorie, le tableau 12 de la norme définit la périodicité des contrôles à réaliser. Compte tenu du domaine d'application (soutènement revêtu ultérieurement), la catégorie d'inspection à retenir est 2 pour les cas courants. Les structures à difficulté technique particulière sont à classer dans la catégorie 3.

Par dérogation à la NF EN 14487-1, les fréquences d'essais minimales sont :

Type d'essai	Fréquence d'échantillonnage mini
Consistance du béton frais	Au minimum pour chaque première bétonnière portée de chaque phase de bétonnage
Durcissement au jeune âge	Au minimum un essai (10 mesures) par pas d'avancement (en piedroit)
Contrôles d'épaisseur sur béton durci	Tous les pas d'avancement (5 mesures). Il est possible de regrouper tous les contrôles en une seule fois par semaine. Pour des raisons de sécurité, ce contrôle doit obligatoirement être réalisé chaque veille de week-end ou de congés.
Résistance à la compression à 7 jours	1/500 m ³ ou 1/2 500 m ² , avec un minimum d'une détermination toutes les 2 semaines
Résistance à la compression à 28 jours	3 contrôles au minimum sur la durée du chantier (premier contrôle couplé avec un essai à 7 jours, puis milieu et fin de chantier), avec un minimum d'un contrôle tous les 3 mois pour les chantiers longs
Adhérence entre couches à 28 jours	En cas de constat de stratification sur les carottes destinées aux essais de résistance en compression
Teneur en fibres dans le béton fraîchement projeté	1/100 m ³ ou 1/500 m ² , avec un minimum d'une détermination toutes les semaines
Capacité d'absorption d'énergie à 7 jours	1/800 m ³ ou 1/4 000 m ² avec un minimum d'une détermination tous les mois
Capacité d'absorption d'énergie à 28 jours	Au moins 1 essai (contrôle couplé avec un essai réalisé à 7 jours), par période de 6 mois

Pour tous ces essais, la fréquence à retenir (en m², m³ ou mois) est celle conduisant au plus grand nombre de prélèvements.

Après accord du maître d'œuvre, un allègement de cette périodicité peut être fixé après obtention de résultats consécutifs conformes. À l'inverse, au début d'une période de production ou aux phases critiques d'un chantier, la fréquence d'essai peut être augmentée (jusqu'à 4 fois).

Pour comparaison, pour un ouvrage de catégorie 2, les fréquences d'essai spécifiées dans la norme NF EN 14487-1 sont :

Type d'essai	Fréquence d'échantillonnage mini
Teneur en fibres sur le béton frais	1 / 200 m ³ ou 1 / 1000 m ²
« Résistance » au jeune âge	1 / 2 500 m ² ou 1 / mois
Résistance à la compression	1 / 500 m ³ ou 1 / 2 500 m ²
Adhérence	1 / 250 m ²
Teneur en fibres dans le béton durci	Lorsque la résistance résiduelle ou la capacité d'absorption d'énergie est évaluée
Capacité d'absorption d'énergie	1 / 400 m ³ ou 1 / 2 000 m ²

Les fréquences de contrôle spécifiées pour les contrôles de résistance en compression sont celles de la norme NF EN 14487-1. Elles sont divisées par 2 pour les contrôles d'énergie absorbée car des mesures de teneur en fibres permettent un contrôle plus rapide et moins coûteux. Ces dernières sont deux fois plus fréquentes que dans la norme NF EN 14487-1.

6.6 CONTRÔLE EXTÉRIEUR

La maîtrise d'œuvre se réserve le droit de faire réaliser, par un prestataire extérieur, inopinément ou pas, tous les contrôles *in situ* qu'elle juge nécessaires.

En particulier, des contrôles des performances mécaniques à 7 et 28 jours du béton projeté (résistance en compression et capacité d'absorption d'énergie) pourront être réalisés afin de vérifier la conformité aux valeurs contractuelles.

Tous les coûts autres que la prestation spécifique au laboratoire du contrôle extérieur (carottages et essais) sont à la charge de l'entreprise (confection des caisses, mise à disposition d'une nacelle élévatrice, électricité, eau...) et déjà pris en compte dans le prix de fourniture et mise en oeuvre du béton projeté, conformément au bordereau des prix.

ANNEXES

ANNEXE 1 : SOMMAIRE TYPE D'UN CCTP

Suivant le guide d'application du fascicule 69 (téléchargeable sur le site du CETU), le CCTP type d'un **projet de tunnel neuf** est généralement composé de 10 livrets :

- Livret 0 : Présentation générale du CCTP
- Livret A : Clauses communes à tous les travaux
- Livret B : Travaux extérieurs
- **Livret C** : Travaux de creusement – **soutènement** (*yc bétons projetés*)
- Livret D : Travaux de reconnaissances et d'auscultations
- Livret E : Travaux de drainage et d'étanchéité
- Livret F : Travaux de revêtement en béton
- Livret G : Travaux d'assainissement, voirie et réseaux divers
- Livret H : Travaux de finition
- Livret I : Travaux d'aménagements architecturaux et paysagers (hors ouvrages de tête en béton traités dans le livret F)

ANNEXE 2 : RÉFÉRENCES

Normes françaises AFNOR

FD P 18-011	Béton - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons
FD P 18-326	Béton - Zones de gel en France
FD P18-464	Béton - Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction
NF P 15-317	Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer
NF P 15-319	Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates
NF P 18-424	Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau
NF P 18-425	Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'air
NF P 18-508	Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité
NF P 18-509	Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses - Spécifications et critères de conformité
NF P 18-513	Addition pour béton hydraulique - Méta-kaolin - Spécifications et critères de conformité
NF P 18-545	Granulats - Éléments de définition, conformité et codification
NF P 95-102	Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Béton projeté - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés

Normes européennes homologuées par l'AFNOR

NF EN 1008	Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton
NF EN 1097-6	Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau
NF EN 12350-2	Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement
NF EN 12350-6	Essais pour béton frais - Partie 6 : masse volumique
NF EN 12350-7	Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité
NF EN 12390-2	Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance
NF EN 12390-3	Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes
NF EN 12504-1	Essais pour béton dans les structures - Partie 1 : carottes - Prélèvement, examen et essais en compression
NF EN 12620+A1	Granulats pour béton
NF EN 13263 1+A1	Fumée de silice pour béton - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité
NF EN 13670/CN	Exécution des structures en béton - Complément national à la NF EN 13670:2013
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 - Partie 1 : échantillonnage de béton frais et de béton durci
NF EN 14488-2	Essais pour béton projeté - Partie 2 : résistance à la compression au jeune âge du béton projeté
NF EN 14488-4+A1	Essais pour béton projeté - Partie 4 : adhérence en traction directe sur carottes
NF EN 14488-5	Essais pour béton projeté - Partie 5 : 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 - Partie 6 : épaisseur du béton sur un support
NF EN 14488-7	Essais pour béton projeté - Partie 7 : teneur en fibres du béton renforcé par des fibres
NF EN 14647	Ciment d'aluminates de calcium - Composition, spécifications et critères de conformité
NF EN 14889-1	Fibres pour béton - Partie 1 : fibres d'acier - Définitions, spécifications et conformité
NF EN 14889-2	Fibres pour béton - Partie 2 : fibres de polymère - Définition, spécifications et conformité
NF EN 196-3+A1	Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité
NF EN 197-1	Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
NF EN 197-2	Ciment - Partie 2 : évaluation de la conformité
NF EN 206/CN	Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206
NF EN 450-1	Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité
NF EN 933-3	Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 3 : détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement
NF EN 933-8+A1	Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable
NF EN 934-2 + A1	Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage
NF EN 934-5	Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 5 : adjuvants pour bétons projetés - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage

Fascicules du CCTG

Guide d'harmonisation des clauses techniques contractuelles relatives aux documents, concernant le management de la qualité et le respect de l'environnement, à fournir par le titulaire d'un marché de travaux

Fascicule 65 du CCTG Travaux (2014). Exécution des ouvrages de génie civil en béton (cf. annexe 4)

Fascicule 69 « Travaux en souterrains » et son guide d'application

Recommandations AFTES

TOS 126	« La technologie et la mise en œuvre du béton projeté renforcé de fibres » (1994)
TOS 150	« La préparation des supports de tunnels recevant un dispositif d'étanchéité par géomembrane » (1998)
TOS 159	« Étanchéité et Drainage des ouvrages souterrains » (2000)
TOS 164	« Conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains » (2001)
TES 215	« Dimensionnement de la protection supérieure des dispositifs d'étanchéité synthétiques » (2009)

Fascicules du Guide ASQUAPRO

Fascicule « Mise en œuvre du béton projeté » (2009)

Fascicule « Formulation des bétons projetés » (2010)

Fascicule « Contrôle de la qualité des bétons projetés » Partie A (2007)

Fascicule « Contrôle de la qualité des bétons projetés » Partie B (2010)

Fascicule « Utilisation des fibres pour le renforcement des bétons projetés de soutènement « provisoire » des tunnels » (2014)

Guide École Française du Béton (EFB)

Guide pour le choix des classes d'exposition des tunnels routiers creusés. Solutions Béton (2010)

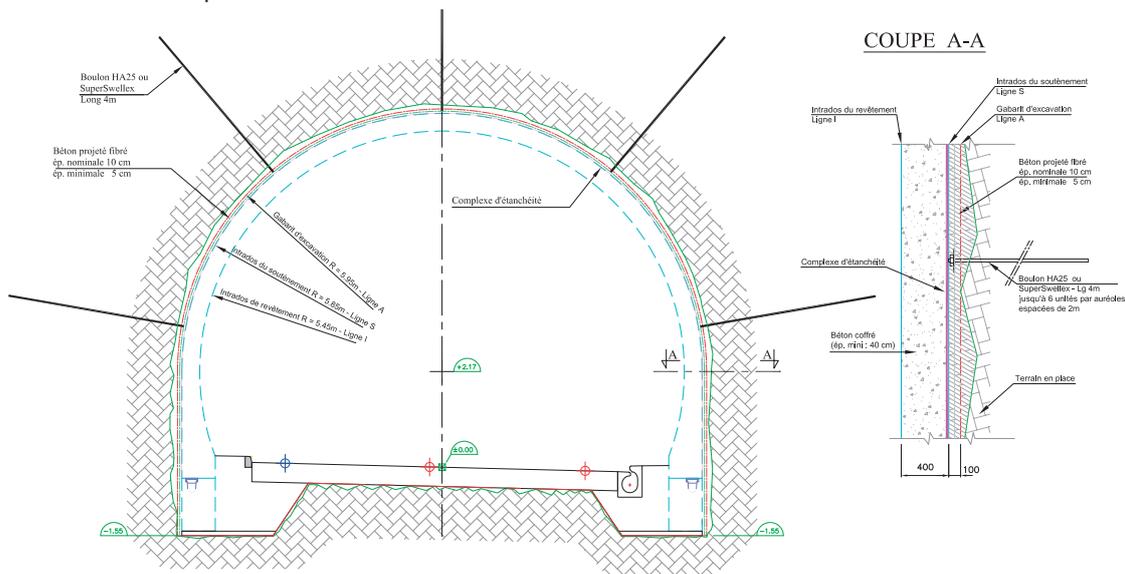
ANNEXE 3 : EXEMPLE DE PROFILS TYPES DE SOUTÈNEMENT

À titre d'exemple, on trouvera ci-dessous des exemples de profils types de soutènement retenus dans le cas du tunnel de Talant sur la LINO de Dijon (creusement de juin 2011 à juillet 2012), sous maîtrise d'ouvrage de la DREAL Bourgogne.

Profil de type P1 :

Ce profil de soutènement est mis en œuvre lors de la rencontre de terrain rocheux sain à moyennement fracturé (calcaires et marnes raides de RMR > 45). Le soutènement est constitué, pour une travée, de :

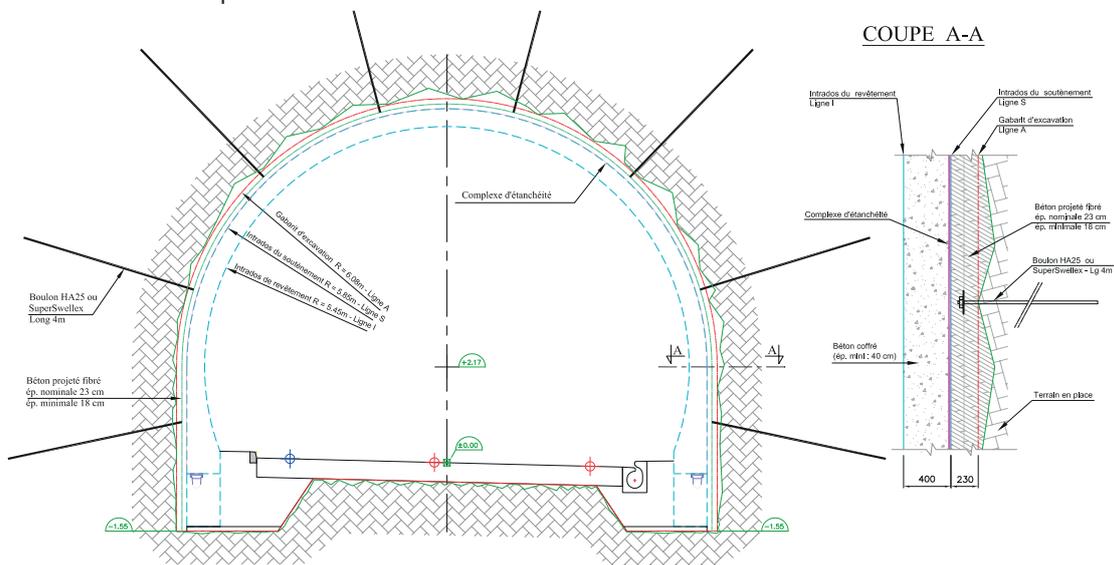
- 5 à 10 cm d'épaisseur de béton projeté fibré,
- 2 auréoles d'ancrages espacées de 2 m comprenant 5 à 6 boulons HA 25 ou superswellex de longueur 4 m repartis uniformément en voûte et piédroits.



Profil de type P2 :

Ce profil de soutènement est mis en œuvre lors de la rencontre de terrain rocheux altéré ou fracturé (marnes de RMR < 45). Le soutènement est constitué, pour une travée, de :

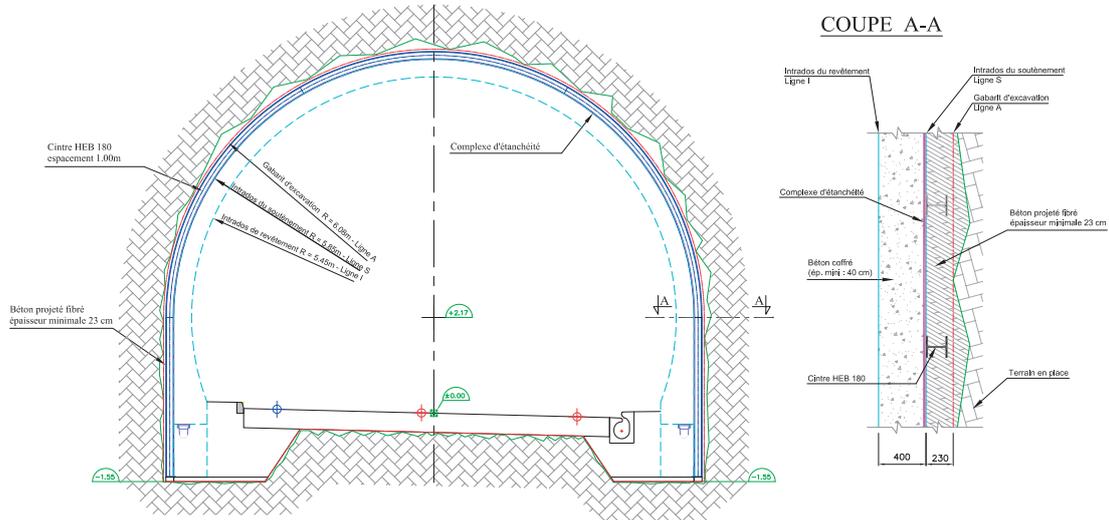
- 18 à 23 cm d'épaisseur de béton projeté fibré,
- 2 auréoles d'ancrages espacées de 1,50 m comprenant 7 à 8 boulons HA 25 ou superswellex de longueur 4 m repartis uniformément en voûte et piédroit.



Profil de type P3 :

Ce profil de soutènement est mis en œuvre lors de la rencontre de terrain rocheux altéré et/ou très fracturé, aux entrées en terre et aux passages de faille. Le soutènement est constitué, pour une travée, de :

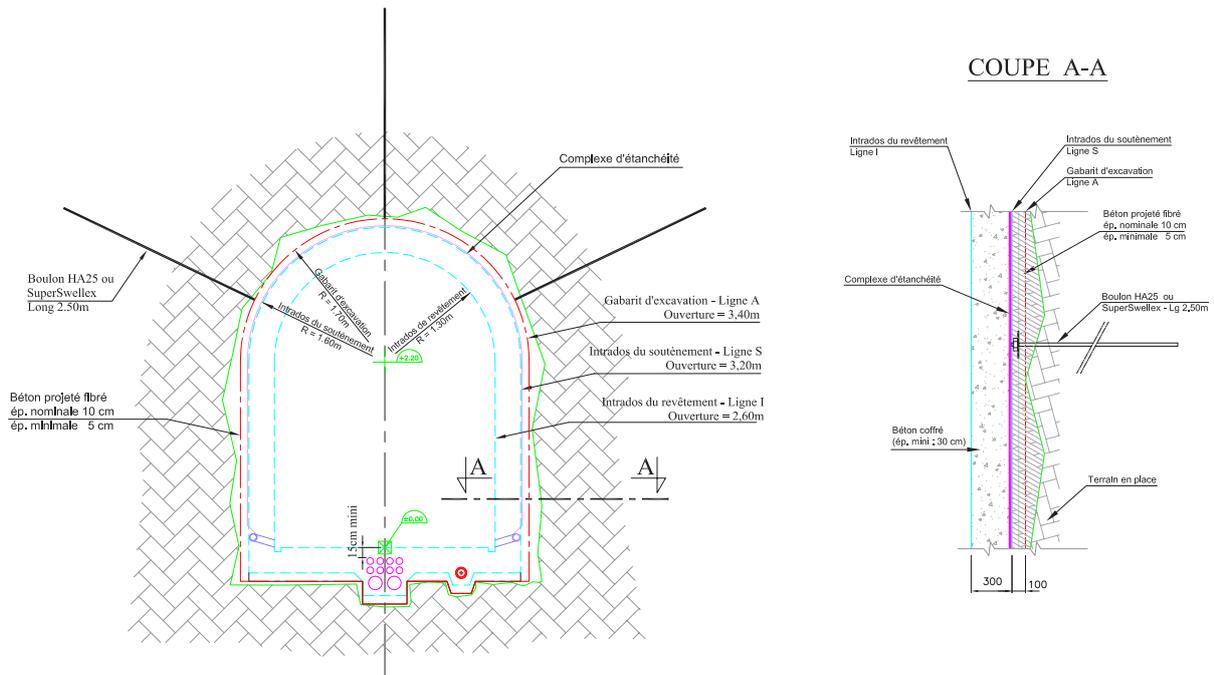
- 23 cm d'épaisseur minimale de béton projeté fibré,
- 2 cintres HEB180 espacés de 1,00 m en tête, et 1,50 m au passage de faille.



Profil de type P4 :

Ce profil de soutènement est mis en œuvre dans les intertubes et les locaux armoires. Le soutènement est constitué, pour une travée de :

- 5 à 10 cm d'épaisseur de béton projeté fibré,
- 1 auréole d'ancrages comprenant 3 à 4 boulons HA 25 ou superswellex de longueur 2,50 m repartis uniformément en voûte et en rein.



ANNEXE 4 : CCTG APPLICABLES AUX MARCHES PUBLICS DE TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL – FASCICULE 65

EXÉCUTION DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL EN BÉTON

VERSION 1.2 DU 28 OCTOBRE 2014

Ce cahier des clauses techniques est téléchargeable à l'adresse suivante :

<http://www.piles.setra.equipement.gouv.fr/publication-fascicule-65-version-provisoire-a1697.html>

Il a été validé par l'Observatoire Économique de l'Achat Public (OEAP) après son examen en conseil scientifique. Le document ne sera définitivement approuvé que lors de son intégration à l'arrêté d'approbation des modifications du CCTG (en attente de signature).

L'utilisation du document reste cependant possible (et même recommandée) aux conditions suivantes :

- ne pas faire référence comme pièces contractuelles aux versions en cours du fascicule 65
- joindre les textes in-extenso en pièces particulières des marchés
- adapter le Cahier des Clauses Administratives Particulières.

Ont participé à l'élaboration de ce document :

Contributeurs principaux

- M. Dierkens - Cerema Centre Est / Département Laboratoire de Lyon
- D. Chamoley - CETU / ASQUAPRO
- C. Larive - CETU / ASQUAPRO

Relecteurs

- C. Aubagnac, B. Clément - Cerema Centre Est / Département Laboratoire d'Autun
- P. Droy - Cerema Centre Est / Département Laboratoire de Lyon
- F. Robert, G. Hamaide, S. Zappelli - CETU
- Diffusion au sein du GT 6 de l'AFTES

Centre d'Études des Tunnels
25 avenue François Mitterrand
69674 BRON - FRANCE
Tél. +33 (0)4 72 14 34 00
Fax. +33 (0)4 72 14 34 30
cet@developpement-durable.gouv.fr

