

***Utilisation des
fibres pour le
renforcement des
bétons projetés
de soutènement
provisoire des
tunnels***

Fascicule

Utilisation des fibres pour le renforcement des bétons projetés de soutènement provisoire des tunnels

1. PREAMBULE	4
2. INTRODUCTION.....	6
2.1. Le béton projeté de soutènement.....	6
2.2. Le renforcement du béton projeté	7
2.3. Les différents types de fibres	9
3. FONCTIONNEMENT MECANIQUE DES BETONS FIBRES	12
3.1. Explications qualitatives	12
3.2. Essais permettant de caractériser la ductilité	14
4. RETOURS D'EXPERIENCE	16
4.1. Exemple de la Descenderie de La Praz (projet TGV Lyon-Turin)	17
4.2. Exemple de la galerie du tunnel de la Croix Rousse (Lyon).....	18
4.3. Exemple du tunnel de Bocognano (Corse du Sud)	19
4.4. Exemple du tunnel de Chavanne (LGV Rhin-Rhône).....	20
4.5. Exemple du tunnel de Nora et Katrina (Grèce)	22
5. PROBLEMATIQUES GENERALES	23
5.1. Composition du béton fibré	23
5.2. Fabrication du béton fibré.....	23
5.3. Pompabilité du béton fibré.....	24
5.4. Usure des machines.....	24
5.5. Risque de percement de la géomembrane d'étanchéité	25
5.6. Comportement différé (fluage)	26
5.7. Effet d'une élévation modérée de la température.....	27
5.8. Comportement sous grandes déformations	28
5.9. Corrosion des fibres	28
5.10. Prévention et sécurité	29
5.11. Résistance au feu des structures.....	29
5.12. Développement durable.....	29
6. ELEMENTS DE REDACTION DES SPECIFICATIONS DES C.C.T.P.	29

6.1.	Spécification sur les ciments	29
6.2.	Spécifications sur adjuvants et additions spécifiques à la voie mouillée	30
6.3.	Spécifications sur la fabrication du béton fibré en centrale	30
6.4.	Spécifications sur les fuseaux granulaires	30
6.5.	Spécifications sur les fibres.....	31
6.6.	Spécifications sur les caractéristiques mécaniques	31
6.7.	Spécifications sur les contrôles de la teneur en fibres.....	36
6.8.	Programme de l'épreuve d'étude du béton fibré	37
6.9.	Programme de l'épreuve de convenance du béton fibré	38
6.10.	Périodicités des contrôles sur chantier	40
6.11.	Intervenants sur chantier	42
6.12.	Spécifications sur la préparation du support.....	44
6.13.	Spécifications sur la cure.....	44
ANNEXE 1 : La classification « BARTON CHART ».....		45
ANNEXE 2 : Autres essais de caractérisation des bétons projetés		48
ANNEXE 3 : Préparation du support.....		52

1. PREAMBULE

*Ce document est le premier fascicule technique ASQUAPRO portant sur l'apport des fibres dans les bétons projetés utilisés pour le **soutènement provisoire des tunnels**.*

Vu l'étendue des diverses applications des fibres dans les bétons projetés, l'ASQUAPRO s'est ici d'abord intéressé au cas des bétons renforcés de **macro-fibres** ($> 300 \mu\text{m}$) projetés par **voie mouillée**¹ pour le soutènement provisoire des tunnels (y compris le soutènement du front de taille). Ce fascicule se limite à un domaine d'application restreint mais il a vocation à être complété par d'autres fascicules sur les bétons projetés renforcés de fibres, par exemple dans le domaine de la réparation et du renforcement des structures en béton et des ouvrages souterrains.

Lors du creusement d'un tunnel, la diminution de la contrainte globale dans le massif au voisinage de l'excavation engendre l'altération et le risque de mouvements du terrain encaissant. Le **soutènement** définit l'ensemble des moyens mis en place pour assurer la stabilité de l'excavation, pour continuer le creusement en sécurité puis réaliser les différentes structures définitives à l'intérieur de l'ouvrage.

Notons que, hormis le soutènement du front de taille, le soutènement « **provisoire** » reste en place définitivement mais un revêtement en béton coffré est quasi systématiquement mis en place en France pour des raisons de :

- pérennité structurelle,
- aérauliques,
- protection de la géomembrane d'étanchéité le cas échéant,
- finition en tunnel routier pour la sécurité du personnel et des usagers.

Le temps maximal avant mise en place du revêtement définitif coffré est de quelques semaines à une année, rarement plus. On ne parle de soutènement définitif que lorsqu'il n'y a pas de revêtement coffré.



Exemple de béton projeté fibré en tête de tunnel

¹ Pour des raisons essentiellement liées au besoin de fort débit dans un milieu confiné, c'est le mode de projection qui est quasiment toujours adopté actuellement pour le soutènement des tunnels. On signale tout de même que l'utilisation de la voie sèche n'est pas totalement exclue : à titre d'exemple, on peut citer le chantier d'Éole où cela a été le cas sur certains tronçons.

L'objectif de ce fascicule technique est de :

- **rappeler les principes de soutènement, les principaux types de fibres et le fonctionnement mécanique des bétons fibrés ainsi que les essais permettant de caractériser leur ductilité (§ 1et 2)**
- **faire un état de l'art objectif sur les potentialités et les limites des principaux types de fibres pour le béton projeté en se basant sur des retours d'expérience de différents acteurs de la profession : maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, entreprises, fournisseurs et laboratoires (§3),**
- **faire le point sur des problématiques générales liées à l'emploi des fibres (§ 4) ,**
- **améliorer les spécifications des CCTP pour obtenir un béton de soutènement fibré répondant aux exigences de chaque chantier (§ 5).**

Ce fascicule a été rédigé lors de réunions en groupe restreint² puis enrichi lors d'une réunion plus large³ à laquelle ont été invité d'autres maîtres d'œuvre. Il a été proposé à l'ensemble des membres ASQUAPRO avant le colloque ASQUAPRO du 11 octobre 2012 et présenté à cette occasion aux participants.

² **Les 9 et 10 février 2012** chez VICAT à l'Isle d'Abeau, en présence de Mme C. Larive (CETU) et Ms. O. Bayard (BASF CC), S. Bru (Sigma béton), D. Chamoley (CETU), B. de Rivaz (Bekaert), L. Fauquignon (BASF CC), A. Maguet (ASQUAPRO), F. Martin (Spie Batignolles TPCI), G. Martin (Elasto Plastic Concrete), S. Mathieu (ArcelorMittal), A. Mestari (ABCCR), A. Regnard (ASQUAPRO), C. Resse (Claude Resse Consultant), D. Rogat (Sigma Béton) ; le 10/02, se sont joints au groupe Ms. G. Exel (Bekaert), F. Malo (SATM grands Travaux), L. Rouppert (LMT), tandis que F. Martin était excusé.

Le 15 mars 2012 au CETU à Bron, en présence de Mme C. Larive (CETU) et Ms. S. Bru (Sigma béton), D. Chamoley (CETU), B. de Rivaz (Bekaert), G. Exel (Bekaert), L. Fauquignon (BASF CC), A. Maguet (ASQUAPRO), S. Mathieu (ArcelorMittal), F. Malo (SATM Grands Travaux), A. Regnard (ASQUAPRO), C. Resse (Claude Resse Consultant), G. Rivallain (ASQUAPRO), D. Rogat (Sigma Béton).

Le 19 juin 2012 chez VICAT à l'Isle d'Abeau, en présence de Mme C. Larive (CETU), Ms. B. Bertrand (EGIS Tunnel), J.P. Bigas (Chryso), D. Chamoley (CETU), C. Chereau (SNCF), B. de Rivaz (Bekaert), N. Dupriez (SETEC), G. Durand (Argotech), G. Exel (Bekaert), L. Fauquignon (BASF CC), M. Garnier (Chryso), A. Maguet (ASQUAPRO), F. Malo (SATM Grands Travaux), A. Regnard (ASQUAPRO), A.Mestari (ABCCR), G. Rivallain (ASQUAPRO).

Le 4 septembre 2012 chez VICAT à l'Isle d'Abeau, en présence de Mme C. Larive (CETU), Ms. J.P. Bigas (Chryso), D. Chamoley (CETU), B. de Rivaz (Bekaert), N. Dupriez (SETEC), G. Durand (Argotech), G. Exel (Bekaert), L. Fauquignon (BASF CC), F. Malo (SATM Grands Travaux), A. Regnard (ASQUAPRO), C. Resse (Claude Resse Consultant), G. Rivallain (ASQUAPRO).

Le 10 janvier 2013 chez VICAT à l'Isle d'Abeau, en présence de Mme C. Larive (CETU), Ms. O. Bayard (BASF CC), B. Bertrand (Egis), J.P. Bigas (Chryso), P. Blondelle (Demathieu-Bard), S. Bru (Sigma béton), D. Chamoley (CETU), B. de Rivaz (Bekaert), G. Exel (Bekaert), L. Fauquignon (BASF CC), S. Mathieu (ArcelorMittal), A. Regnard (ASQUAPRO), C. Resse (Claude Resse Consultant), G. Rivallain (ASQUAPRO), D. Rogat (Sigma Béton).

³ **Le 10 mai 2012** chez VICAT à l'Isle d'Abeau, en présence de Mme C. Larive (CETU) et Ms. O. Bayard (BASF CC), B. Bertrand (EGIS Tunnel) , S. Bru (Sigma Béton), D. Chamoley (CETU), C. Chereau (SNCF), B. Dattée -Vernat (Chryso), B. de Rivaz (Bekaert), G. Exel (Bekaert), L. Fauquignon (BASF CC), M. Garnier (Chryso) , G. Le Bihan (BG Ingénieurs Conseils) , A. Maguet (ASQUAPRO), S. Mathieu (ArcelorMittal), F. Malo (SATM grands Travaux), G. Mazzolénì (CETU), A. Regnard (ASQUAPRO), C. Resse (Claude Resse Consultant), G. Rivallain (ASQUAPRO), D. Rogat (Sigma Béton).

2. INTRODUCTION

2.1. Le béton projeté de soutènement

La recommandation du GT20 de l'AFTES (TOS n°164 de mars-avril 2001) décrit de façon détaillée le rôle du béton projeté dans le soutènement de l'excavation lors du creusement de tunnels, galeries ou cavités souterraines.

Selon les propriétés mécaniques du terrain, la dimension et la profondeur de l'ouvrage, le rôle du béton projeté aura plusieurs fonctions. Elle distingue les rôles de **peau protectrice**, **peau résistante**, et **anneau de structure**. Elle rappelle que ces trois modes de fonctionnement ne sont pas exclusifs et que leurs limites ne sont pas tranchées.

• type 1 : le béton projeté comme *peau protectrice* ; le béton projeté agit ici à la manière d'un ciment, permettant d'assurer le jointoiment des grains de sol et/ou des fragments de roche, et d'éviter qu'une désorganisation en chaîne du terrain se développe ; ce soutènement intervient uniquement en surface, à une échelle allant de quelques millimètres au décimètre, et n'est pas sollicité mécaniquement ;

• type 3 : le béton projeté comme *anneau de structure* ; dans ce dernier cas, le béton projeté doit être conçu comme une véritable structure, capable de reprendre à la fois des efforts normaux et des moments ; tout comme pour le béton projeté de type 2, un renforcement est nécessaire.

• type 2 : le béton projeté comme *peau résistante* ; ce deuxième type de soutènement doit être conçu comme une structure composite, faisant intervenir un anneau de terrain renforcé et une peau de béton projeté ; dans ces conditions, le béton projeté maintient le terrain, préserve sa cohésion à faible distance de la paroi (sur des épaisseurs allant de quelques décimètres à un mètre) et sert de « pont » entre les profils successifs de soutènement (boulons notamment) ; il est surtout sollicité en cisaillement et doit être renforcé à l'aide d'un treillis soudé, de fibres ou de cintres ;

Extraits des recommandations de l'AFTES (TOS n°164)

Nous nous intéressons dans ce document aux **2 premiers types** : **peau protectrice** (épaisseur de 3 à 5 cm) et **résistante** (épaisseur de l'ordre de 10 cm à 20 cm). Dans ce cadre, le béton projeté doit :

- ✓ être « souple », pour suivre les mouvements de convergence du terrain ;
- ✓ adhérer suffisamment au support ;
- ✓ monter rapidement en résistance pour être efficace le plus vite possible.

Il n'existe pas de béton projeté « standard » pour le soutènement des tunnels. Il doit être adapté au contexte géologique qui détermine les sollicitations à reprendre, et au contexte local qui détermine les possibilités d'approvisionnement.

Ce fascicule est centré sur l'emploi des fibres pour le renforcement des bétons projetés de soutènement provisoire de tunnels, ce qui ne signifie pas que les fibres peuvent toujours se substituer aux treillis soudés. Il a pour objectif d'optimiser l'emploi des fibres tout en donnant les conditions et limites de leur utilisation.



Projection robotisée de béton fibré en front de taille

2.2. Le renforcement du béton projeté

Le béton projeté de type 1 se limite à un simple effet de protection immédiate de l'excavation au creusement. Il est néanmoins recommandé de le renforcer par des fibres pour améliorer sa « déformabilité ».

Le béton projeté de type 2 est le plus souvent utilisé en complément de soutènement métallique (boulons, cintres réticulés) ou en remplacement de blindage métallique (entre cintres). Il doit être alors **renforcé par un treillis soudé ou des fibres**. Le choix est à faire pour chaque projet en fonction du contexte géologique.

On se référera pour ce choix aux documents de référence sur la conception et le dimensionnement des soutènements (par exemple, la classification de Barton donnée en annexe 1, les recommandations du GT 20 de l'AFTES...).

Le renforcement peut être obtenu dans de nombreux cas par **l'addition de fibres** dans le béton projeté. Par rapport aux bétons renforcés de treillis métalliques, les avantages sont :

- ✓ Par sa rapidité de mise en œuvre, l'utilisation de béton fibré minimise le nombre des personnels présents sous l'excavation à soutenir et leur durée d'exposition (en particulier dans le cycle d'excavation au front de taille). Exécutée au moyen d'un robot de projection, la couche de béton fibré permet même de n'exposer aucun ouvrier et donc d'améliorer la sécurité du personnel (en creusement traditionnel, il n'y a pas de mécanisation du procédé de pose du treillis soudé).
- ✓ Les bétons fibrés permettent de s'adapter au profil de l'excavation.
- ✓ Les bétons fibrés évitent la chute de morceaux de béton sous des efforts de flexion importants (avec treillis, la structure globale a un comportement ductile mais à l'échelle locale, on peut avoir des ruptures fragiles de petits morceaux de béton). Les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.

Le coût de la fourniture des fibres par kg est plus élevé que celui d'un treillis métallique mais on économise sur le temps de mise en œuvre (suppression de la pose du treillis). Il est important de toujours raisonner sur le coût global de l'opération.

Les bétons renforcés de fibres sont intéressants dans la mesure où leur comportement est **ductile** et non pas fragile⁴, **point essentiel pour le soutènement**. Le choix futur des fibres doit être guidé par ce besoin de rupture ductile.

Les fibres dans le béton doivent apporter une meilleure résistance aux déformations en flexion du béton soumis à des charges. C'est lorsque apparaît la première fissure que les fibres sont sollicitées. Les fibres doivent alors apporter une meilleure cohésion et résistance intrinsèque de la matrice et augmenter ainsi la résistance à la propagation et à l'ouverture de la fissuration. Le béton fibré doit avoir la capacité d'absorber l'énergie de fissuration et les fibres permettent de redistribuer les contraintes mécaniques.



Action de « couture » des fibres

Nous rappelons néanmoins que cette méthode 'avec fibres' atteint sa **limite** dans les tunnels où les déformations sont importantes lors du creusement (fortes convergences) ou dans des terrains très facturés. En effet dans ce cas, la mise en place d'un treillis soudé (avec des fils de 8 à 10 mm de diamètre) **solidarisé avec les têtes de boulons** est recommandée car elle permet de mieux associer mécaniquement les boulons et le béton projeté.



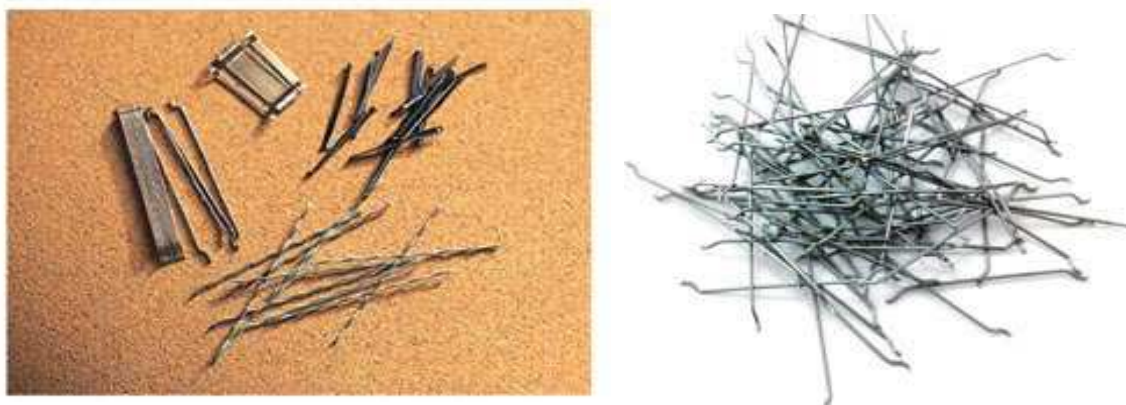
Exemples de projection de béton sur treillis soudé

⁴ Un matériau est dit « ductile » lorsqu'il est capable de montrer, sous charge constante, des déformations excédant sa limite élastique. A contrario, un matériau est dit « fragile » s'il ne présente pas un palier de ductilité de longueur appréciable.

2.3. Les différents types de fibres

Initialement, pour renforcer le béton projeté associé au boulonnage, des treillis soudés étaient mis en place. Puis, il y a une trentaine d'années, en recherchant une équivalence à l'association béton projeté / treillis soudé, des **fibres métalliques** ont été ajoutés au béton.

Le retour d'expériences sur ce type de fibres montre leur efficacité et met en évidence de nombreux facteurs influençant leur mise en œuvre et leurs performances (diamètre, longueur, forme, matériaux, matrice béton, etc.).



Exemples de fibres métalliques

Dans les années 80 également, les **fibres synthétiques** ont fait leur apparition. Elles étaient alors courtes et peu performantes mécaniquement en raison de leur mode de rupture fragile. Au début des années 2000, les fournisseurs de fibres synthétiques ont commencé à proposer des fibres dont les dimensions sont sensiblement égales à celles des fibres métalliques. Pour certaines d'entre elles, on obtient maintenant un renforcement mécanique réel du béton projeté, en particulier pour la résistance à la flexion et au cisaillement.

Cependant, leur utilisation pour des applications structurales⁵ bute sur l'absence de méthode de dimensionnement reconnue, étape qui a été franchie par les fibres métalliques grâce au projet national BEFIM (BEtons de Fibres Métalliques), aux travaux de la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux) et au Model Code for Concrete Structures⁶ proposé par la fib⁷ en 2010. Aujourd'hui, les recommandations pour les calculs structurels des bétons renforcés de fibres sont uniquement validées pour les fibres « dont le module d'Young n'est pas significativement affecté par le temps et/ou les phénomènes thermo-hygrométriques », ce qui vise à limiter leur application aux fibres métalliques.

Il manque également aux fibres synthétiques un nombre suffisant de retours d'expérience sur la durabilité du renforcement obtenu, en particulier vis-à-vis du fluage. Enfin, la tenue au feu d'éléments renforcés par des macro-fibres synthétiques peut poser problème du fait de la fonte des produits polymères à 165°C.

⁵ On désigne ainsi des applications nécessitant un dimensionnement par le calcul.

⁶ Le 'Model Code' donne également des conditions d'acceptation des fibres pour le remplacement de tout ou partie des treillis soudés qui seront présentés dans le prochain fascicule ASQUAPRO sur les renforcements structurels.

⁷ fib : fédération internationale du béton (international federation for structural concrete)

Comme pour les fibres d'acier, il existe une grande variété de macro-fibres synthétiques et, si certaines de leurs caractéristiques sont homogènes, d'autres sont notablement différentes d'un produit à l'autre.



Exemples de fibres synthétiques

Aujourd'hui, les fibres synthétiques se décomposent en deux types de fibres :

- ✓ Les micro-fibres : Elles présentent en général une longueur de 6 à 12 mm pour un diamètre de 16 à 35 μm . Elles peuvent être monofilaments, multifilaments ou fibrillées. Elles sont utilisées pour limiter, voire empêcher la fissuration au jeune âge due au retrait plastique et l'écaillage du béton soumis à un incendie. Vu les faibles dosages utilisés (1 à 2 kg/m^3) et le module d'Young assez bas de ces fibres (3 à 5 GPa, à comparer à environ 30 GPa pour un béton), on suppose généralement que l'effet de renforcement de ces fibres disparaît après quelques heures de prise du béton.



Exemples de micro-fibres synthétiques

- ✓ Les macro-fibres : Selon la norme 14889-1 et 2, au-dessus de 300 μm de diamètre commence la classe II des macro-fibres. À ce jour, l'utilisation des macro-fibres est de plus en plus répandue pour le renforcement des bétons projetés utilisés en soutènement provisoire des tunnels.



Exemples de macro-fibres synthétiques

On peut se référer pour de plus amples informations au livre « Matériaux organiques spécifiques pour la construction », paru aux Editions Hermes, et plus précisément au chapitre 9 sur les fibres organiques dans les matériaux cimentaires, ainsi qu'à de nombreuses publications, dont celles de P. Rossi (LCPC).

Outre les fibres métalliques et macro-synthétiques, il faut également citer, pour les bétons projetés, les fibres en fonte amorphe, principalement utilisées pour les travaux de réparation, surtout dans les égouts et les bétons réfractaires pour la réparation de four, et les fibres de verre, dont les versions adaptées à la projection sont en développement à ce jour.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisses, crantées, ondulées, à crochet...), résistances mécaniques (résistance à la traction).

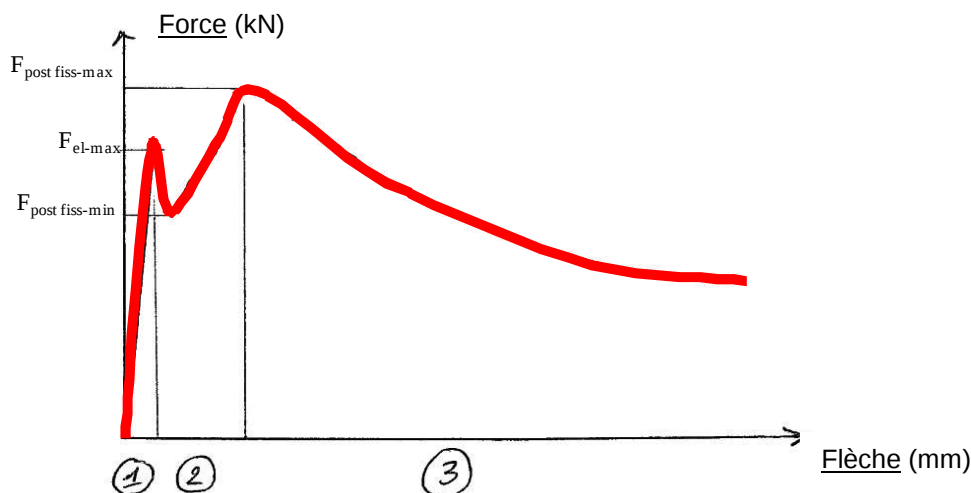
Nous rappelons ci-dessous quelques données sur les principales macro-fibres disponibles sur le marché, pour le béton projeté en voie mouillée utilisé classiquement en France :

	Fibres d'acier	Fibres synthétiques	Fibres de fonte amorphe
Longueur (mm)	30 – 35	30 – 65	15 - 30
Diamètre ou Largeur (mm)	0,5 – 0,75	0,3 – 1	0,18 – 0,23
Module d'Young (GPa)	200 – 210	3 – 10	130
Résistance à la traction (MPa)	1000 – 2000	200 – 600	2000
Densité	7,8	0,9 - 1,5	7,2
Dosage type (en kg/m ³ dans le malaxeur)	20 - 40	5 - 7	10 - 25
Nombre de fibres au kg	8000 - 16000	70000 - 75000	100000-385000

3. FONCTIONNEMENT MECANIQUE DES BETONS FIBRES

3.1. Explications qualitatives

Pour analyser les performances des bétons fibrés, il faut prendre en compte la combinaison de la fibre et du béton comme un matériau composite, ce qui signifie intégrer le transfert des charges de la matrice en béton au réseau de fibres. Ce transfert se réalise schématiquement en 3 phases distinctes, repérées sur le graphe type suivant :



F_{el-max} : Force maximale correspondant à la limite élastique du matériau fibré

$F_{post\ fiss-min}$: Force minimale atteinte après fissuration

$F_{post\ fiss-max}$: Force maximale atteinte après fissuration grâce à la reprise des efforts par les fibres.

Phase 1 : Adhérence sur toute la longueur de la fibre, pendant la phase de déformation élastique, dépendant de :

- la surface spécifique d'échange (nombre, longueur, diamètre des fibres),
- l'état de surface et donc de la qualité de l'interface fibre-matrice,
- la compacité de la matrice béton.

Phase 2 : Mobilisation des fibres au droit des microfissures, dépendant :

- du module d'élasticité des fibres,
- du nombre de fibres,
- du profil et de l'orientation des fibres,
- de la qualité de l'interface fibre-matrice (adhérence),
- de la compacité de la matrice béton.

Phase 3 : Mobilisation complète de l'ancrage, qui peut s'avérer être « total » ou « glissant » (ce dernier étant recherché en soutènement). Elle dépend de :

- la forme de l'ancrage,
- le glissement possible de la fibre dans sa gaine (qualité de l'interface et orientation fibres/fissures),
- la compacité de la matrice béton,
- le nombre de fibres,
- la résistance en traction de la fibre.

Ce transfert est donc efficace si les trois points suivants sont respectés :

- ✓ La surface d'échange est suffisante (nombre, longueur, diamètre des fibres). Par exemple, un nombre et une longueur insuffisants de fibres peut entraîner un comportement fragile même si les caractéristiques de l'interface et les caractéristiques de la fibre sont satisfaisantes. En effet, les charges n'étant alors pas suffisamment transférées au réseau de fibres, la fissure risque de contourner les fibres et la rupture devient alors fragile.
- ✓ La qualité de l'interface fibre-matrice permet un bon transfert des charges (ancrage de la fibre dans le béton). Même si le nombre et les caractéristiques de la fibre sont satisfaisants, un ancrage insuffisant des fibres (glissement, interface peu compacte) entraîne une rupture fragile ou pseudo-fragile ; les fibres sont extraites de leur gaine en béton sans être sollicitées mécaniquement ou sous une sollicitation largement inférieure à leur capacité de reprise.
- ✓ Les propriétés mécaniques intrinsèques (module de Young et résistance à la traction) de la fibre permettent de reprendre les efforts sans rompre, ni s'allonger trop fortement. A l'inverse, une fibre aux propriétés insuffisantes entraîne un comportement fragile malgré un nombre important de fibres et une interface efficace. Une fibre à faible module d'Young entraîne une forte ouverture de fissure avant que la fibre ne reprenne des efforts. Une fibre dont la résistance en traction est plus faible que la capacité de l'ancrage rompra dans sa gaine de béton avant d'être extraite.

Lors de la fissuration du béton, la ductilité du matériau fibré provient principalement de la friction générée par l'extraction de la fibre dans sa gaine béton et non de l'écrouissage⁸ de la fibre. L'orientation des fibres joue également un rôle important. Un comportement optimal du béton fibré correspond à une extraction de la fibre à des valeurs de sollicitations proches de ses capacités maximales de reprise.

Les macro-fibres synthétiques ont une section suffisante (diamètre équivalent entre 0,5 et 1 mm) pour pouvoir apporter une ductilité. Elles permettent d'introduire un très grand nombre de fibres tout en gardant une bonne rhéologie du béton. La quantité généralement introduite est de l'ordre de 5 à 7 kg/m³, soit un dosage volumique de 0,55 à 0,77% (densité 0,9).

Dans le cas des fibres métalliques, la section est similaire à celles des fibres synthétiques (diamètre équivalent entre 0,5 et 1 mm). La quantité généralement introduite est de l'ordre de 25 à 40 kg/m³ ce qui correspond à un dosage volumique de 0,31 – 0,50% (densité 7,8).

Le volume de fibres métalliques est donc inférieur à celui des macro-fibres synthétiques de même section. Il se trouve compensé par des meilleures propriétés mécaniques de la fibre (module d'Young et résistance à la traction) et un meilleur ancrage mécanique (pour les fibres munies d'extrémités à crochets par exemple).

Au final, l'applicateur a le choix entre **deux solutions** qui peuvent fournir un comportement de rupture ductile au béton : l'emploi de fibres métalliques aux caractéristiques mécaniques supérieures, munies de dispositifs assurant un bon ancrage mécanique ou bien l'emploi de macro-fibres synthétiques aux caractéristiques mécaniques inférieures mais présentes en plus grand nombre.

⁸ L'écrouissage de matériaux ductiles désigne la phase d'évolution des déformations plastiques. Un matériau parfaitement plastique présente un palier plat. L'écrouissage peut être positif (augmentation de la charge pendant la déformation plastique) ou négatif (diminution).

3.2. Essais permettant de caractériser la ductilité

Extrait de la norme NF EN 14487-1 (Annexe A) :

« Les différentes façons de spécifier la ductilité du béton projeté renforcé par des fibres en termes de résistance résiduelle et de capacité d'absorption d'énergie ne sont pas directement comparables.

La résistance résiduelle doit être spécifiée lorsque les caractéristiques du béton sont utilisées dans le modèle de conception structurelle.

La valeur d'absorption d'énergie mesurée sur une dalle peut être spécifiée lorsque, en cas de boulonnage dans le rocher, l'accent est mis sur l'énergie devant être absorbée durant la déformation du rocher ».

Dans le cadre de ce fascicule, on ne présente ici que l'essai de base utilisé pour la conception et le contrôle des bétons projetés fibrés pour les soutènements provisoires de tunnels, c'est-à-dire l'essai décrit dans la norme **NF EN 14488-5** pour évaluer la capacité d'absorption d'énergie. Les informations sur les autres types d'essais sont données en annexe 2.



Projection robotisée dans une caisse d'essai

C'est un essai sur appui continu, développé initialement par la SNCF, qui permet de comparer les bétons projetés renforcés de fibres et de treillis soudés ainsi que différents types et dosages de fibres, « à condition que le mode de rupture soit le même », précise la norme EN 14487-1.

Cet essai consiste à appliquer une charge de poinçonnement centrée sur une « dalle-éprouvette » carrée de 60 cm de côté et 10 cm d'épaisseur, appuyée sur un cadre métallique de 50 cm de côté, jusqu'à obtention d'une flèche de 30 mm. On calcule ensuite l'énergie absorbée (aire sous la courbe charge/flèche de 0 à 25 mm de flèche).

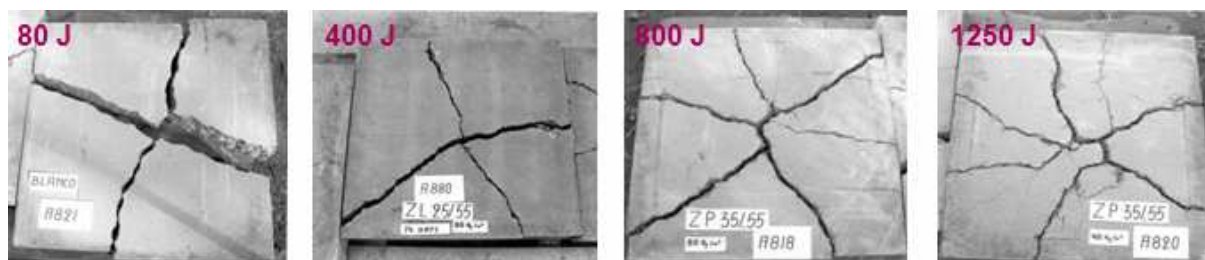


Essai de capacité d'absorption d'énergie

L'essai permet de reproduire de manière assez réaliste la flexion bi-axiale susceptible de se produire dans certaines applications, en particulier au niveau du rocher. Il montre l'aptitude de la dalle à encaisser une déformation locale et simule, à l'échelle du laboratoire, le comportement réel du soutènement.

L'essai d'absorption d'énergie permet de contrôler que les exigences spécifiées dans les clauses techniques sont respectées. Il permet également de vérifier tous les paramètres influençant la qualité du béton projeté renforcé par des fibres.

Cet essai permet également de vérifier la multi-fissuration du matériau fibré (fissures plus nombreuses et moins larges qu'avec un béton non fibré). A noter cependant qu'on peut parfois obtenir des valeurs élevées d'énergie avec un nombre de fissures plus réduit que les exemples ci-dessous.



Exemples de faces inférieures de dalles pour différents niveaux d'énergie absorbée

Le dimensionnement des soutènements proposé dans la classification de la « Barton Chart » est basé sur les résultats de l'essai de la norme EN 14488-5. Elle permet de donner l'épaisseur minimum de béton projeté renforcé de fibres métalliques et l'énergie à atteindre en fonction de la nature du sol (cf en annexe 1 la publication n°14 de la Norwegian Tunnelling Society).

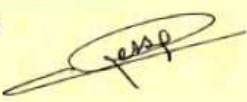
En France, les prescripteurs utilisent préférentiellement d'autres documents (cf recommandations du GT7 de l'AFTES entre autres) . Dans tous les cas, les soutènements sont définis sous forme de **profils-types**, choisis en fonction des caractéristiques géologiques et géotechniques du terrain encaissant.

4. RETOURS D'EXPERIENCE

Ce paragraphe présente des retours d'expérience de chantiers de tunnels au cours desquels le béton projeté de soutènement a été renforcé de fibres, que cela ait été spécifié dans le marché ou ait fait l'objet d'une modification des spécifications.

Avec l'évolution des formes de marchés vers des contrats de conception-réalisation ou des PPP (Partenariats Public-Privé), les entreprises sont de plus en plus impliquées dans la définition des soutènements. Dans tous les cas, elles sont responsables de leur bonne tenue.

Les problèmes de ruptures locales sont très majoritairement dus à des chutes de béton frais et non à des chutes de blocs du terrain encaissant. Elles ont pour origine la projection de sur-épaisseurs locales (mauvaise maîtrise du pilote de robot). C'est pourquoi l'ASQUAPRO insiste fortement sur le besoin de **certification des porte-lances et pilotes de robot**.

ASQUAPRO		ASsociation pour la QUALité de la PROjection des mortiers et bétons	
APTITUDE A LA PROJECTION DES MORTIERS ET BETONS			
QUALIFICATION DES OPERATEURS DE LA PROJECTION			
CERTIFICAT DE PORTE LANCE N° XXX			
Je soussigné, Claude Resse , mandaté par Asquapro en tant que certificateur, atteste que :			
Monsieur :	NOM	Prénom	
né le :	aa/mm/jj	Ville ou pays	
présenté par l'entreprise :	Nom de l'entreprise et/ou d'agence		
afin de subir les tests réalisés à :	Lieu des tests et dates de la session		
en vue de vérifier son aptitude à la projection du béton, a obtenu des notes pratiques et théoriques			
qui ont permis de lui délivrer le certificat de : PORTE LANCE (PL, PLC ou PLHC)			
Tests réalisés : Voie sèche pour la pratique, voie sèche et voie mouillée pour la théorie			
Certificat valable jusqu'au (date du certificat + 3 ans)			
Le Pecq, le date de délivrance			
Le certificateur :		L'examineur :	
			
ASQUAPRO		A. MESTARI	
Siège social : Bureaux SNCF-ingénierie, 6 av. François Mitterrand 93574 LA PLAINE SAINT DENIS Cedex			

L'utilisation des fibres permet d'augmenter la cohésion du béton frais ; le rôle des accélérateurs est également prépondérant pour la tenue à très court terme. Les chutes de béton durci sont encore plus dangereuses car les risques de présence de personnels sont plus forts, d'où la nécessité d'avoir une montée en résistance rapide du béton, même si cela n'est pas forcément spécifié dans le marché.

Les matériels de projection eux-mêmes (généralement des robots pour les chantiers de tunnels) sont pour beaucoup dans la qualité des travaux. Les matériels récents offrent une meilleure maîtrise du dosage en accélérateur et, pour certains d'entre eux, la possibilité

d'obtenir un flux de béton quasi continu (ce qui évite le feuilletage de la couche de béton et améliore donc sa cohésion).

Les exemples de chantiers suivants sont proposés et présentés par des entreprises ou fournisseurs. Ils présentent tous un intérêt spécifique par rapport à la problématique des bétons projetés fibrés.

On rappelle que depuis plus de trente ans un retour d'expérience complet a été réalisé pour les bétons projetés renforcés de fibres métalliques dans les travaux de génie civil (tunnels routiers et ferroviaires, galeries hydrauliques, égouts). Ce retour d'expérience concluant a permis de valider la solution de fibres métalliques à travers les recommandations de l'AFTES en 1993 et de nombreuses recommandations internationales.

Des expériences plus récentes avec des fibres polymères permettent de comprendre petit à petit le comportement de ce type de fibres. Les nouveaux bétons renforcés de macro-fibres synthétiques ne sont pas encore parfaitement connus mais ils présentent certains intérêts. Leurs caractéristiques de fluage, résistance au cisaillement, contrôle de la fissuration, ainsi que leur durabilité et leurs méthodes de conception nécessitent des études complémentaires ; les retours d'expérience de chantiers où ils sont mis en œuvre permettent de faire progresser l'état des connaissances. C'est dans cet esprit qu'est rédigé ce paragraphe et, plus globalement, ce fascicule.

4.1. Exemple de la Descenderie de La Praz (projet TGV Lyon-Turin)

Soutènement avec une problématique « convergence » - Travaux de 2005 à 2009

Texte proposé par Florent Martin (SPIE BATIGNOLLES TPCI)

La descenderie de la Praz, d'une section moyenne de 85 m² et d'une pente de 12%, a été réalisée à l'explosif dans une géologie composée essentiellement de schistes houillés. La couverture maximale est de 800 m.

Le comportement du massif encaissant (schiste très fracturé) est essentiellement guidé par un problème de convergence sans efforts localisés.

Les profils de soutènement prévus vont :

- du profil boulonné avec une couche de béton projeté et fibres métalliques puis une simple couche de béton projeté non armé, non fibré
- au profil avec cintre lourd, forepolling et remplissage en béton projeté non fibré.

Du point de vue hydrogéologique, la descenderie de la Praz est caractérisée par de fortes venues d'eau (40 à 50 l/s cumulé en moyenne) et la traversée de nombreuses zones sous pression (30 bars en moyenne). Avec les premiers 100 m d'excavation, pour la couche de confinement, l'ensemble béton projeté / accélérateur de prise / moyens de mise en œuvre / type de fibres, a fait l'objet de tests et convenances afin de déterminer un optimum vis-à-vis des conditions effectivement rencontrées. Principaux objectifs : résistance à jeune âge, limiter les chutes de béton du fait des venues d'eau, pérennité à long terme.

Au cours des travaux, des efforts dissymétriques et une modification dans le temps des contraintes géotechniques appliquées à la coque béton projeté ont généré un écaillage de cette coque non fibré 200 à 300 m à l'arrière du front.

Le recours systématique à un béton projeté renforcé avec des fibres métalliques BEKAERT Dramix RC65/35BN (dosage: 25 kg/m³ de béton avant projection) a permis de résoudre le problème de chutes d'écailles de béton projeté. L'ajout de fibres métalliques a permis de limiter l'effet « mille feuilles », d'augmenter les épaisseurs de béton mises en œuvre par passe et de limiter le nombre de couches.

Les fibres métalliques ont permis de résister à un effort soutenu. En effet la décompression du massif peut conduire à une augmentation des efforts de compression, cisaillement, flexion.

La descenderie de la Praz ne dispose pas d'un revêtement définitif, pour éviter tous risques en phase travaux et dans le temps, un treillis soudé avec boulon Swellex a été posé en extrados sur tout le linéaire où la couverture est supérieure à 350 m.

Le chantier de la Praz a été caractérisé par l'évolution et l'adaptation régulière des soutènements mis en œuvre par rapport aux soutènements prévu du fait des variations géotechniques et hydrologiques propres aux descenderies. Ces évolutions sont encadrées et prévues par un marché adapté.

4.2. Exemple de la galerie du tunnel de la Croix Rousse (Lyon)

Soutènement avec une problématique « faille » - Début des travaux en 2010

Texte proposé par Florent Martin (SPIE BATIGNOLLES TPCI)

Le tunnel de la Croix Rousse a été réalisé dans le cadre particulier d'un chantier en conception-réalisation. D'une section moyenne de 90 m², ce projet est réalisé au cœur d'un massif cristallin composé de gneiss et granit.

Dans la géologie rencontrée, le facteur dimensionnant des profils de soutènement est la problématique de faille et/ou de fracturation : c'est le boulonnage qui travaille.

D'après la « Barton Chart » (cf [annexe 1](#)), le profil adapté est composé de boulons et de béton projeté non fibré. Les convergences attendues et vérifiées sont nulles ou très faibles.

Cependant pour :

- limiter les chutes de béton frais,
- permettre, avec le matériel employé, la mise place en 2 phases des quantités de béton projeté nécessaires au confinement et au comblement des hors profils avant la pose de l'étanchéité (épaisseur de 15 à 30 cm),

il a été décidé d'incorporer systématiquement dans le béton projeté des fibres synthétiques BASF Meyco SP650.

En collaboration avec le bureau d'études intégré de Spie Batignolles TPCI, il a été retenu comme objectif dimensionnant pour le béton projeté fibré une énergie de déformation de 500 joules.

Après une campagne d'essai, un ratio de 5 kg/m³ a été retenu. L'ensemble des contrôles et rétro-analyses réalisés en cours de travaux ont mis en évidence que le ratio utilisé permet d'atteindre 700 joules (très bon mélange des fibres). Les résistances moyennes mesurées sur éprouvettes à 28 jours sont supérieures à 35 MPa pour un objectif de 25 MPa.

Ce dosage, associé à des formules de béton étudiées spécifiquement et à un accélérateur adapté, a permis une très bonne qualité de mise en œuvre, pas de chute de béton frais, pas d'écaillage a posteriori, une très bonne accroche des couches de béton projeté entre elles et la pose immédiate de l'étanchéité sur le béton projeté (géotextile de 600 g/m²).

4.3. Exemple du tunnel de Bocognano (Corse du Sud)

Une des premières applications de macro-fibres synthétiques en France – Travaux de 2007 à 2009

Texte proposé par Laurent Fauquignon (BASF)

Le village de Bocognano se situe dans une zone montagneuse. La géologie se révèle difficile : un terrain très hétérogène, composé de granit fragmenté dur. La solution adoptée est donc celle de la méthode traditionnelle avec attaque à l'explosif pour le creusement. L'avancement du percement de ce tunnel routier monotube de 400 m de long pour une surface d'excavation de 75 à 90 m² est de 1,50 m/jour.

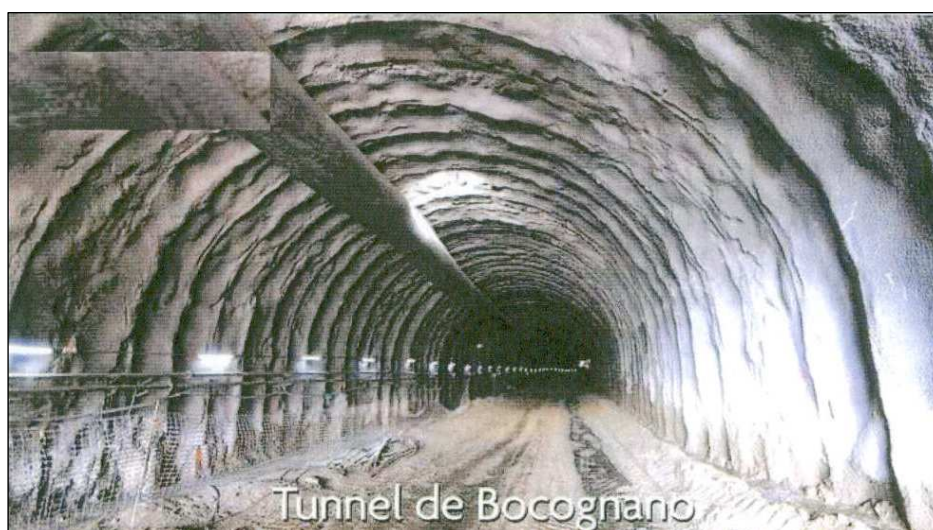
A l'issue de chaque tir et après évacuation des matériaux, la voûte et les piédroits sont stabilisés par une 1^{ère} couche de béton projeté en voie mouillée, mise en œuvre sur 5 cm à l'aide d'un robot de projection. On procède ensuite à l'installation de cintres métalliques HEB 180 posés tous les 1,90 m.

Le confortement entre cintres consiste à projeter une couche de 10 à 15 cm de béton fibré en voie mouillée sur l'ensemble de la surface excavée, avec pour objectifs recherchés par la maîtrise d'œuvre une pose directe des membranes d'étanchéité PVC sans augmentation de l'épaisseur du géotextile de protection, une mise en œuvre simplifiée et sécurisée pour le personnel et une réduction de l'usure du matériel de projection.

La fiche signalétique du béton utilisé est : Rc = 25 MPa à 28 j (14 MPa à 48 heures) en valeurs moyennes, E/C = 0,52, Dmax = 10 mm, slump = 21 à 23 cm, ciment CEM II 42,5 CE PM, granulats 0/2 et 0/6 concassés, superplastifiant, activateur non alcalin (ajouté en bout de lance). Le béton est fabriqué sur site dans une petite centrale dédiée de 20 m³/h.

Les fibres utilisées sont des macro-fibres synthétiques BASF CC. Le dosage est de 6 kg/m³, les fibres sont déversées dans le malaxeur au moment de la fabrication du béton. Le produit se présente sous la forme de bandes plates de 50 mm de long pour 18 mm de large, qui se délitent durant le malaxage, ainsi, le poids volumique de la matière étant de 0,9 g/cm³, on dispose au final d'environ 72 000 fibres / kg dans le mélange.

Le chantier de Bocognano est la première application de fibres polypropylène sur l'intégralité d'un tunnel en France.



Confortement par cintres et béton projeté fibré

4.4. Exemple du tunnel de Chavanne (LGV Rhin-Rhône)

Utilisation des 2 types de fibres – Travaux de 2007 à 2009

Texte proposé par Nicolas Dupriez (SETEC)

Le tunnel de Chavanne est un tunnel ferroviaire mono-tube d'une longueur de 1730 m, à deux voies. Le tunnel traverse essentiellement des terrains marneux et calcaires avec des passages schisteux. La section excavée était de 120 à 160 m² selon les profils de soutènements mis en œuvre.

L'excavation a été réalisée en méthode traditionnelle dont 500 ml en abattage mécanique et 1230 ml à l'explosif par volée de 1 à 5 m de longueur.

Plusieurs familles de soutènements provisoires ont été mises en œuvre au cours de l'excavation. Elles sont décrites brièvement ci-dessous :

- 1er profil : Terrain rocheux sain à peu fracturé

Volée d'excavation de 4 à 5 m, 10 cm de béton projeté fibré associé à des boulons de type Swellex longueur 4 m (5 à 10 U/ml)
--

- 2^{ème} profil : Terrain marneux ou rocheux altéré / fracturé

Volée d'excavation 2 à 3 m, 15 à 25 cm de béton projeté fibré, associé à des boulons de type Swellex de longueur 4 m (6 à 15 U/ml). 20 cm de béton coulé en radier provisoire contre-voûté pour la protection des matériaux marneux.
--

- 3^{ème} profil : Terrain rocheux ou marneux altéré ou très fracturé ou présence de faille

Pas d'avancement de 1,5 m, cintres HEB 200 espacés de 1,5 m associés à 25 cm béton projeté fibré en remplissage entre cintres. Contre cintres et 20 cm de béton coulé en radier contre voûté pour la protection des matériaux marneux.
--

- 4^{ème} profil : Terrain marneux ou argileux altéré à très altéré ou présence de faille

Pas d'avancement de 1,5 m, cintres HEB 220 espacés de 1,5 m associés à 25 cm de béton projeté fibré en remplissage entre cintres. Voûte parapluie composée de 30 tubes pétroliers de 15 ml renouvelés tous les 9 ml. Boulonnage de front par 35 boulons en fibre de verre de 18 ml renouvelés tous les 9 ml. Contre cintres et 20 cm de béton coulé en radier contre voûté.

Sur l'ensemble des profils, la coque en béton projeté fibré était recouverte d'une couche de 5 cm de béton projeté non fibré afin d'éviter l'endommagement du complexe d'étanchéité par les fibres métalliques. Le front de taille a fait l'objet d'un confinement systématique en béton projeté fibré de 3 à 6 cm d'épaisseur.

Le CCTP prévoyait la mise en œuvre d'un béton projeté fibré à base de ciment CEM I 42,5 ou 52,5 PMES avec un dosage en fibres métalliques de 35 kg/m³ minimum. Les valeurs moyennes minimales de résistance à la compression définies au marché étaient de 3,5 MPa à 4 heures, 15 MPa à 2 jours, 20 MPa à 7 jours et 30 MPa à 28 jours. Les valeurs minimales à obtenir avec l'essai poinçonnement flexion à 28 jours (NF EN 14488-5) étaient de 600 Joules sous une déformation maximale de 25 mm sans valeur inférieure à 500 Joules.

L'entreprise a proposé un béton projeté fibré à base de ciment CEM I 52,5 N dosé à 400 kg/m³. Dans un premier temps, les fibres utilisées étaient métalliques de type BEKAERT modèle RC 65/35 puis ARCELOR modèle FE 65/35. Elles étaient incorporées au béton

directement à la centrale. Le dosage initial était de 35 kg/m³ de béton conformément aux exigences du marché.

Les résistances en compression du béton sont restées conformes aux prescriptions du CCTP sauf pour les essais de résistances à très jeunes âges (4 heures). Dans un premier temps ces valeurs ont été mesurées par la méthode Hilti puis par le biais d'écrasement sur cubes. Les résultats obtenus étaient très variables et de l'ordre de 2 à 4,5 MPa pour 3,5 MPa demandés.

Après avoir excavé 800 ml de tunnel, l'entreprise a proposé de remplacer les fibres métalliques par des macro fibres synthétiques en polypropylène. Cette méthodologie présentait l'avantage de permettre de s'affranchir de la couche de béton projeté non fibré en protection de l'étanchéité. L'épaisseur totale de béton a été maintenue constante, mais le nombre d'opération de projection a pu être réduit. Les épreuves de convenance ont donné des résultats conformes qui ont permis de valider le passage en fibres synthétiques. Le dosage mis en œuvre était de 6 kg de fibres par m³ de béton.

Après le passage en fibres polypropylène, les résultats de contrôles de résistance à la compression sont restés sensiblement identiques avec toujours des difficultés pour obtenir de bonnes résistances à jeune âge. Lors des essais de convenance, l'énergie moyenne a été de 628 J. Les résultats des essais de contrôle en chantier ont été plus limités avec des valeurs de l'ordre de 560 J au lieu des 600 demandés au marché. Il a été considéré que ces valeurs étaient acceptables, vu les faibles convergences observées jusqu'alors sur le chantier. L'origine de ces écarts peut être due à des variations importantes de teneur en fines du sable et donc de teneur en eau (utilisation de matériaux locaux).

Synthèse des essais réalisés sur le béton projeté fibré :

Type de fibres	Nbre d'essais	Rc moy à 2 jours (MPa)	Rc moy à 7 jours (MPa)	Rc moy à 28 jours (MPa)	Date des essais
Polypropylène	27	16,8	22,1	30,9	Juin à Novembre 2008
Métalliques	60	18,4	25,5	33,3	Juillet 2007 à Mars 2008
Tout type de fibres	84	17,9	24,4	32,6	Juillet 2007 à Novembre 2008

Les valeurs moyennes des Rc obtenues avec les bétons projetés fibrés renforcés de fibres polypropylènes sont plus faibles de 10% environ par rapport au béton projeté renforcé de fibres métalliques. Cependant il est difficile de conclure sur un lien direct entre Rc et type de fibres mises en œuvre vu qu'on dispose de 2 fois plus de valeurs en métallique.

A la mise en œuvre, l'utilisation des fibres polypropylène n'a posé aucun problème particulier. En revanche, les zones soutenues à l'aide de ces fibres ont montré une tendance plus importante à la fissuration que les zones armées de fibres métalliques, et ceci malgré des terrains et des convergences comparables. Hormis les fibres, cette tendance à la fissuration peut avoir plusieurs causes (terrains légèrement différents, sous épaisseurs localisées de béton, etc.) et une analyse précise serait nécessaire pour imputer avec certitude l'augmentation de la fissuration à l'utilisation des fibres polypropylène. Par ailleurs, les fissurations observées n'étaient pas de nature à mettre en péril la tenue du soutènement.

4.5. Exemple du tunnel de Nora et Katrina (Grèce)

Un autre exemple d'utilisation de fibres synthétiques – Travaux de 2008 à 2009

Texte proposé par Jean Philippe Bigas (CHRYSO)

Le projet réalisé par l'entreprise VINCI Grands Projets consiste en la réalisation d'une portion d'autoroute à 2 x 3 voies avec plusieurs sections de tunnels, dont les tunnels de Nora et Katrina, d'une longueur de 1200 m chacun afin de traverser les gorges de la région de Maliakos dans le nord de la Grèce.

Les sections courantes des tunnels sont de 92 m² et de 120 m², excavées par volée de 2 à 3 ml. Le projet prévoyait un revêtement de béton projeté fibré avec des fibres métalliques. Une variante en macro-fibres synthétiques a pu être validée et mise en œuvre sur le chantier.

Le confortement du tunnel s'effectue par cintres réticulés enrobés par le béton projeté fibré.

Les fibres utilisées sont des macro-fibres synthétiques de la société CHRYSO du type CHRYSO®Fibre GUNITA 50 de 50 mm de longueur, d'un poids volumique de 0,93 g/cm³, d'un diamètre de 1 mm, d'une résistance à la traction de 500 MPa et crantées sur toute leur longueur. Le dosage retenu lors des essais de convenance est de 7 kg/m³. Les fibres sont introduites grâce à une machine de dosage automatique reliée à la centrale, elles sont déversées sur le tapis de chargement du malaxeur au moment de la fabrication du béton.

Le béton utilisé rentre dans la classe de résistance C25/30. Les exigences de maintien de rhéologie sont de 2h30 pour une résistance initiale minimale garantie à 24h de 11 MPa. Le rapport eau sur ciment (E/C) est borné à 0,48 maximum. Le squelette granulaire est constitué de 1206 kg de sable 0/4 et 644 kg de graviers 4/8 pour 400 kg de ciment TITAN CEM II 42,5 PM. La fluidité est assurée par un superplastifiant haut réducteur d'eau dosé à 1% additionné de 0,4% de stabilisateur. L'utilisation d'un activateur de béton projeté de type non alcalin est une première sur un chantier grec.

Les robots de projection utilisés sur site sont de type NORMET.

En terme de performances, les bétons ont délivré des résistances en compression de 15 MPa à 24h, de 46 MPa à 7 jours et de 52 MPa à 28 jours (valeurs moyennes). Les résultats en flexion 3 points à l'échéance de 7 jours sont de 7,6 MPa en moyenne et sont réalisés selon la norme NF EN 12390-5 sur prismes de 15x15x70 cm en bétons fibrés coulés au laboratoire. Les valeurs moyennes d'énergie selon la norme NF EN 14488-5 obtenues sur dalles 60x60x10 cm sont de 960 Joules.

L'utilisation de ce type de fibre limite les risques d'accidents dus aux fibres métalliques apparentes par piqures des doigts ou de la main pour les équipes de pose de la membrane d'étanchéité. Un gain moins immédiat concerne l'usure des toupies et des robots de projection.

Le choix technique de VINCI Grands Projets de remplacer les fibres métalliques par les macro-fibres synthétiques a permis de s'affranchir de la deuxième passe de béton projeté pour la protection de la membrane d'étanchéité. Sur toute la durée du chantier, cette modification du phasage des travaux a permis une réalisation des opérations de béton projeté plus rapide et a engendré des économies sur les quantités de béton.

L'innovation consiste à traiter, pour la première fois en Grèce, l'intégralité d'un chantier de tunnel routier avec un béton projeté renforcé de fibres polymères.

5. PROBLEMATIQUES GENERALES

Les nombreux retours d'expérience nous font apparaître que les performances peuvent être très différentes d'une fibre à l'autre, même au sein d'un même type de produits. Ce chapitre traite donc de l'apport des fibres métalliques et macro-synthétiques au regard de thèmes qui sont souvent la source de questionnements des prescripteurs. Il ne s'agit pas dans la suite du document d'établir une comparaison critique entre les fibres mais, plus objectivement, de renseigner leurs performances.

5.1. Composition du béton fibré

La fibre ne doit pas être ajoutée à une formulation béton de base inchangée (même si en pratique, cela reste souvent le cas...). La formulation doit faire l'objet d'une étude soignée (rapport G/S, quantité de fines, type de ciment, d'activateur....) et adaptée à chaque type de fibres (*cf fascicule Formulation de l'ASQUAPRO*). Pour cela, un béton d'étude validé aux épreuves de convenance est nécessaire. La consistance des épreuves d'études et de convenance est décrite aux paragraphes §5.7 et §5.8.

5.2. Fabrication du béton fibré

Pour assurer une bonne homogénéité du mélange, les fibres sont obligatoirement introduites dans le malaxeur de la centrale. La durée de malaxage après leur introduction doit être ajustée selon le type de fibres.

Le contrôle de la teneur en fibres est réalisé par bons de pesée (contrôle interne).

Pour les sites de production importants ($5000 \text{ m}^3 / \text{an}$), un système de doseur automatique est systématiquement recommandé. Ce système de doseur automatique directement relié à la centrale à béton répond aux critères de sécurité et d'assurance qualité requis par de nombreux chantiers.



Centrale à béton

5.3. Pompabilité du béton fibré



On vise généralement une classe de consistance S3 ou S4 pour favoriser la pompabilité du béton (exemple ci-contre d'un slump de 210 mm, correspondant à la fourchette haute de la consistance S4).

L'ajout de fibres modifie la consistance et la pompabilité du béton (slump plus petit). Pour les dosages usuels de fibres métalliques (25 à 40 kg/m³), l'influence est très limitée. Pour les fibres macro-synthétiques, l'incidence est souvent beaucoup plus importante et nécessite alors une adaptation de la formulation du béton par ajout d'eau ou de superplastifiant, voire modification de la formule (S/G). Cette adaptation doit être faite pendant les épreuves d'étude, avec des ajustements éventuels pendant les épreuves de convenance.

Essai d'affaissement au cône d'Abrams

En fonction du mode de malaxage et de nombreux autres paramètres, un risque de formations d'oursins existe surtout pour les fibres métalliques, même si cette problématique est plus récurrente en voie sèche qu'en voie mouillée. Cette difficulté potentielle doit être évaluée lors des épreuves de convenance. Les fibres encollées sont souvent une bonne solution pour pouvoir ajouter des fibres métalliques avec un rapport longueur/diamètre : $L/D > 65$ sans problème d'oursins. Leur utilisation permet d'assurer une bonne introduction et distribution des fibres dans la matrice béton.

Pour faciliter la mise en œuvre des fibres rigides, leur longueur est généralement limitée au 2/3 du diamètre des tuyaux de pompage.

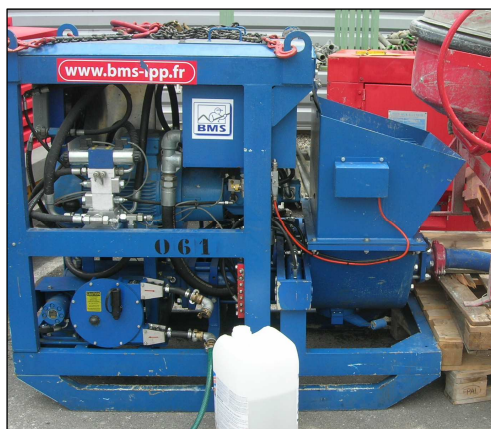
5.4. Usure des machines

L'usure des machines n'est pas un critère de choix des fibres. Quelles que soient les fibres, il y a un surcoût sur les pièces d'usure quand on utilise un béton fibré par rapport à un béton non fibré.

Même si l'usure est plus importante avec les fibres métalliques qu'avec les fibres synthétiques (surtout au niveau de la buse et du diffuseur), les granulats concassés ou semi-concassés sont encore plus abrasifs que les fibres métalliques.

On peut noter néanmoins que les fibres à base de tôles découpées usent plus les tuyaux que les fibres en acier tréfilé. Par ailleurs, pour les fibres synthétiques, il faut prévoir un barrage flottant devant les crépines de pompe car ces fibres flottent et peuvent griller le moteur de la pompe.

L'entretien du matériel doit être encore plus soigné lorsqu'on utilise des fibres. En effet, si les pistons ne sont pas bien nettoyés, il y a un risque de vides de béton et donc des surdosages en raidisseur à chaque coups de piston. Cela conduit à un feuilletage du béton. Les machines à flux continu de pompage et de projection évitent ce phénomène.



Machine de projection VM

5.5. Risque de percement de la géomembrane d'étanchéité

De nombreux tunnels étanchés par géomembrane présentent des arrivées d'eau. Devant ce constat, certains ont pu incriminer les fibres métalliques de percer la membrane PVC mais il n'y a pas de lien établi avec l'utilisation de fibres dans le soutènement provisoire.

Des essais ont été entrepris par l'AFTES en 1994 et n'ont pas mis en évidence de perforation de la géomembrane d'étanchéité protégée par un géotextile de protection de 600 g/m² par des fibres métalliques Dramix de BEKAERT (TOS n°123 de mai-juin 1994).

Depuis cette date, d'autres fabricants de fibres métalliques sont apparus avec des fibres de forme et de diamètre différents. Certaines pouvant être plus ou moins agressives vis-à-vis des membranes d'étanchéité, le GT9 de l'AFTES a alors souhaité approfondir le problème du risque éventuel de percement des géomembranes d'étanchéité par ces fibres (pression au bétonnage puis chargement du terrain dans le temps) et mettre en place une procédure de validation pour les nouvelles fibres métalliques. Les conditions expérimentales de ces nouveaux essais étaient plus sévères que pour l'essai initial. Ils ont montré que certaines fibres peuvent traverser la membrane. Toutefois, les cas de percement étaient assez rares et les conditions expérimentales pas assez proches des réalités de chantier pour que l'AFTES communique sur ces résultats.

Actuellement dans les CCTP, sont donc généralement utilisées les recommandations de l'article « Avancement des études sur les protections des géomembranes à utiliser dans les tunnels creusés, sur support en béton projeté avec fibres métalliques incorporées » (TOS n°215 de sept-oct 2009), à savoir :

- soit la mise en œuvre d'une couche de béton non fibré de 3 cm d'épaisseur minimale (5 cm en moyenne),
- soit l'utilisation d'un géotextile de protection de 1200 g/m².

Les avis sont partagés sur le choix entre les deux techniques proposées. Il faut bien sûr comparer leurs coûts et délais mais également prendre en compte les risques de litiges au moment de la réception du support avec l'étancheur.

C'est un **principe de précaution** car il n'y a pas de retour d'expérience de chantier où on a la preuve du percement de la géomembrane par des fibres métalliques.

Il faut néanmoins noter que :

- ✓ Le risque de percement de la géomembrane par les fibres métalliques est plus élevé au niveau des masques de bétonnage.
- ✓ Même avec les fibres synthétiques, l'AFTES recommande de spécifier un géotextile de protection de 800 g/m² à la place du 600g/m² habituellement mis en œuvre pour les bétons non fibrés. En effet, la présence des fibres macro-synthétiques est susceptible d'augmenter la rugosité du support (aspérités formées par le mélange fibre/béton) (cf tableau n°1 de la revue TOS n°150 de nov-déc. 1998).
- ✓ La rugosité de surface dépend beaucoup de la qualité de projection du béton. La forme des granulats (concassés ou roulés) peut influencer tout autant sur l'agressivité superficielle que les fibres.



Pose d'un géotextile renforcé sur béton projeté fibré

5.6. Comportement différé (fluage)

Le **fluage** d'un matériau caractérise le fait que celui-ci se déforme dans le temps sous efforts constants.

Les fibres métalliques, au regard des niveaux de contrainte atteints dans le béton, ne fluent quasiment pas. Il n'en est pas de même pour les fibres synthétiques (micro ou macro) qui fluent intrinsèquement de manière non négligeable.

Il faut cependant rappeler que le comportement du matériau composite (béton-fibres) n'est pas régi par le comportement des fibres seules. La qualité de l'interface fibre-matrice et le transfert de charge entre matrice et fibres, lié à la nature des fibres mais aussi à leur ancrage et à leur nombre, sont également des paramètres prépondérants.

Une fois le béton fissuré, le fluage est lié au module d'Young et au comportement visco-élastique des fibres macro-synthétiques (qui varient en fonction du type de polymère utilisé), mais aussi au nombre de fibres et la qualité de l'interface .

Des essais comparatifs, représentatifs du comportement des matériaux, ont mis en évidence un fluage de bétons renforcés de fibres polymères. Ils sont présentés dans l'article [*« Long term behaviour of steel- and macro-synthetic fibre reinforced concrete beams »*, de Nicola Buratti, Claudio Mazotti, Marco Savoia, de l'université de Bologne, dans la revue *Concrete Plant International* de mai 2010 (CPI-5/2010)].

D'autres études expérimentales réalisées par l'Université de Valence montrent que le fluage du matériau composite diminue lorsque le nombre de fibres synthétiques augmente (*rapport disponible sur demande au secrétariat Asquapro : asquapro@orange.fr*).

Pour être représentatives du comportement des matériaux, les expérimentations faites sur le fluage doivent se rapprocher :

- ✓ des conditions de charge des bétons : on considère qu'il est plus « sécuritaire » de réaliser les essais de fluage sous flexion (et non en compression).
- ✓ des formules utilisées sur chantier (la matrice béton ayant une part importante dans le fluage du matériau composite) : par exemple, des essais faits avec un béton de $E/C = 0,6$ et 0,5% de fibres en volume (soit 40 kg/m³ de fibres métalliques contre 4 kg/m³ de fibres synthétiques) donnent une tendance sur la sensibilité au fluage mais ne sont pas représentatifs des conditions de chantier ($E/C \leq 0,5$ et dosage mini des fibres synthétiques de 5 kg/m³ en général).

En pratique, il n'existe pas de retour d'expérience de tunnel dans lequel le fluage de béton projeté renforcé de fibres synthétiques ait posé un problème. Toutefois, le nombre de retours d'expérience en tunnels de grande section (de type routier ou ferroviaire) reste limité et nous n'avons pas identifié de cas d'utilisation dans des roches très poussantes.

La prise en compte du fluage est de la responsabilité de l'entreprise et de la maîtrise d'œuvre, qui doivent vérifier la tenue dans le temps de l'ouvrage (déformée et ouvertures de fissures). Ce suivi correspond à l'obligation de surveillance des soutènements jusqu'à stabilisation des convergences. En cas de fissuration du béton projeté, des mesures de suivi renforcé et/ou de confortement doivent être mises en œuvre.

A ce jour, pour le soutènement provisoire de tunnels creusés dans un terrain encaissant ne présentant pas de grosses difficultés géotechniques, on peut considérer que le fluage ne remet pas en cause l'utilisation des fibres synthétiques. Dans tous les cas, on rappelle que le béton projeté n'est qu'un des éléments de soutènement, en complément aux boulons et/ou cintres.

Pour augmenter les connaissances sur le fluage des bétons projetés fibrés, une campagne expérimentale est en cours d'étude au sein de l'ASQUAPRO.

5.7. Effet d'une élévation modérée de la température

Le fluage du béton renforcé de fibres synthétiques est sensible à la température, des essais ont montré une augmentation significative du fluage à 30°C (*cf l'article CPI-5/2010 cité ci-dessus*).

En cas de tunnel à grande profondeur/forte température, des études complémentaires (recherche bibliographique approfondie et/ou programme d'essais) devraient être réalisées avant d'utiliser des fibres synthétiques. Notons que des bétons avec des macro-fibres de polypropylène ont été mis en œuvre avec succès à des températures supérieures à 40°C dans des mines de cuivre en Afrique du Sud sur le site de Palabora mais les exigences ne sont pas forcément les mêmes dans les mines que dans les tunnels ; il n'y a pas eu d'études particulières sur le fluage lors de ce chantier.

Des essais réalisés par BASF en 2011 suivant les spécifications de *l'Acceptance criteria for concrete with synthetic fiber* (AC 32) dans leur version de vieillissement accéléré (annexe C) montrent qu'aucune altération de leur fibre de polypropylène n'a lieu en environnement alcalin à une température de 50°C (*rapport disponible sur demande au secrétariat Asquapro : asquapro@orange.fr*), ce qui ne contredit pas le fait que le fluage est plus élevé quand la température augmente.

5.8. Comportement sous grandes déformations

Les fibres synthétiques sont plus performantes pour les grandes déformations (même au-delà des 30 mm de l'essai EN 14 488-5) mais, en pratique, pour le soutènement de tunnels routiers ou ferroviaires, on ne laissera pas des fissures très ouvertes sans venir renforcer le soutènement. Les grandes déformations ne sont donc pas déterminantes dans le choix des fibres pour ce domaine d'application.

5.9. Corrosion des fibres

Le métal est par nature sensible à la corrosion, ce qui n'est pas le cas des matériaux synthétiques. Pour les fibres métalliques, la corrosion peut survenir mais le retour d'expérience conclut sur deux points :

- ⇒ la corrosion superficielle uniquement des fibres de surface peut provoquer des salissures sur le parement ;
- ⇒ elle ne génère ni pathologie ni perturbation dans le fonctionnement mécanique des structures.

Cette corrosion potentielle des fibres métalliques peut être minimisée dans la pratique en :

- ⇒ optimisant la formulation du béton (pour augmenter sa compacité)
- ⇒ projetant une couche de finition non fibrée,
- ⇒ utilisant des fibres galvanisées.

Tant que les fissures restent inférieures à 0,5 mm, l'état de l'art et des retours d'expérience de plus de 30 ans montrent que la corrosion n'est pas un problème au cœur du béton (se reporter par exemple au projet Brite Euram III [*« Final report on Durability of Steel Fibre reinforced Concrete (SFRC) »*], *Project funded by the European Community under the Industrial & Materials Technologies*).

De manière générale, ce n'est pas un sujet de préoccupation pour les bétons projetés pour le soutènement immédiat des tunnels. Ce phénomène de corrosion superficielle peut devenir un enjeu uniquement pour des bétons projetés de revêtement définitif ou pour des tunnels soumis à des venues d'eau permanentes, en particulier sous le niveau de la mer. Mais, dans

ce cas, la durabilité de la matrice béton est tout aussi importante que celle des fibres métalliques.

5.10. Prévention et sécurité

Ce point n'intervient pas comme critère de choix des fibres pour le soutènement provisoire des tunnels, le personnel de chantier devant de toute façon être protégé lors de la projection.

Lorsque le béton projeté a un usage définitif, le problème est plus sensible car les usagers et le personnel d'exploitation risquent de toucher les parements lorsqu'ils circulent sur les trottoirs. Il est toujours possible de recouvrir les fibres métalliques par une couche de finition non fibrée de quelques centimètres d'épaisseurs.

5.11. Résistance au feu des structures

La tenue au feu du béton projeté n'est pas prise en compte dans le choix de la formulation du béton pour le soutènement provisoire des tunnels. On note toutefois que les fibres synthétiques fondent à 165°C. Cela représente un atout pour les micro-fibres polypropylène qui créent, lors de leur fusion puis de leur vaporisation, un réseau de capillaires empêchant ou limitant l'écaillage du béton. Pour des fibres structurelles, c'est plutôt une faiblesse.

Ce thème n'est pas traité dans ce document.

5.12. Développement durable

Des études sont en cours pour intégrer la dimension 'Développement durable' dans l'analyse de l'apport des fibres pour le renforcement des bétons projetés.

Les fibres peuvent apporter des contraintes supplémentaires pour l'évacuation des déchets (pertes).

Il est intéressant de comparer les impacts environnementaux des différentes fibres entre elles et avec les treillis soudés.

A ce stade, ces considérations font l'objet d'un travail en cours au CETU et plusieurs fournisseurs se mobilisent pour apporter les informations nécessaires. Il est trop tôt pour donner de premières tendances.

6. ELEMENTS DE REDACTION DES SPECIFICATIONS DES C.C.T.P.

6.1. Spécification sur les ciments

Pour assurer la montée en résistance rapide du béton de soutènement, on recommande de prescrire des ciments de type CEM I ou CEM II.

On attire l'attention sur les ciments avec ajouts de laitier (CEM III, CEM V ou certains ciments CEM II). 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.

De même, tant que la durée avant revêtement définitif reste inférieure à 2-3 ans, la prescription de ciment ES ou PMES n'est pas forcément nécessaire. Cette spécification peut en effet être en contradiction avec le besoin de déformabilité du béton (recherche de bas module) car les ciments ES ou PMES sont souvent associés à une classe 52,5.

6.2. Spécifications sur adjuvants et additions spécifiques à la voie mouillée

Se reporter au fascicule « Formulation » de l'ASQUAPRO pour définir les spécifications concernant les superplastifiants augmentant la pompabilité du béton (cf NF EN 934-2/A1 et A2) et les activateurs non alcalins (accélérateurs de prise ⁹pour bétons projetés suivant la norme NF EN 934-5 et accélérateurs de durcissement ¹⁰suivant la norme NF EN 934-2/A1 et A2).

6.3. Spécifications sur la fabrication du béton fibré en centrale

Quand on ne peut pas utiliser un doseur automatique, les fibres doivent être pré-conditionnées en sacs correspondant à la quantité nécessaire de fibres pour le volume de gâchée.

Pour les chantiers importants (> 5000 m³ de béton), l'utilisation d'un doseur automatique est préconisée.

La durée de malaxage après introduction des fibres et leur mode d'introduction doivent être ajustées au moment des essais de convenances, avec le matériel utilisé pour le chantier.

La centrale devra être d'un niveau suffisant pour maîtriser le E/C (E/C usuel < 0,5) :

- pesée de l'eau avec précision
- hygromètres fiables...

L'objectif est d'assurer la traçabilité de la fabrication du matériau et de répondre aux exigences d'assurance qualité.

6.4. Spécifications sur les fuseaux granulaires

L'ASQUAPRO a fait évoluer la forme des fuseaux AFTES et AFNOR pour prendre en compte le fait que la courbe granulaire pouvait sortir par la partie inférieure de ces fuseaux entre 0,5 et 1,5 mm, sans que cela pose problème sur la qualité des bétons projetés. (cf *Fascicule Formulation de l'ASQUAPRO*)

Toutefois, le respect des fuseaux a beaucoup plus d'importance pour la voie sèche que pour la voie mouillée pour laquelle ils ne sont donnés qu'à titre indicatif.

On peut accepter d'en sortir dans certains cas car l'ajout de fibres peut nécessiter des adaptations.

⁹ Adjuvant qui diminue le temps pour passer de l'état plastique à l'état rigide du béton.

¹⁰ Adjuvant qui augmente la vitesse de développement des résistances initiales du béton.

6.5. Spécifications sur les fibres

6.5.1. Type de fibres

Les fibres doivent répondre aux exigences :

- des normes NF EN 14889-1 et ISO 13270, pour les fibres métalliques,
- de la norme NF EN 14889-2, pour les fibres polymères.

Il est également nécessaire de demander le **marquage CE système 1 (spécifiques aux fibres structurales)**

Pour des fibres dont le matériau ou les références seraient mal connus, il faudrait s'assurer de leur compatibilité à long terme avec le milieu alcalin (*cf annexe C de l'AC 32*).

6.5.2. Dosage minimum en fibres

Il n'est pas forcément nécessaire d'imposer un dosage minimum en fibres mais alors ce dernier doit être déterminé, au plus tard, lors des épreuves de convenance (en comparant éventuellement plusieurs dosages et plusieurs types de fibres). Il devra ensuite être contrôlé pendant toute la durée du chantier (avant et après projection).

Si on souhaite imposer un dosage minimum sans imposer un type de fibres, il faut penser à spécifier des valeurs ou des plages de valeur différentes pour les fibres métalliques et pour les fibres synthétiques, typiquement de 20 à 35 kg/m³ pour les premières, de 5 à 8 kg/m³ pour les secondes (quantités de fibres introduites dans le malaxeur). Il peut être dommage d'être trop précis dans les marchés car de nouveaux types de fibres sont en développement et ce sont les performances du béton fibré, à court et moyen terme, qui intéressent le maître d'ouvrage, pas le type de fibres, d'où l'idée de spécifier plutôt les objectifs que les moyens de les atteindre.

6.6. Spécifications sur les caractéristiques mécaniques

Comme indiqué en introduction, en soutènement provisoire, le béton doit pouvoir suivre les mouvements du terrain et avoir un comportement ductile. Il est donc contre-productif d'avoir une matrice béton trop performante. De plus, si ses performances augmentent, il faut augmenter les exigences relatives à la capacité d'absorption d'énergie pour assurer la non-fragilité.

Conformément aux recommandations des normes et en l'absence de résultats en nombre suffisant à 7 jours, les spécifications contractuelles se basent encore beaucoup sur les résultats à 28 jours. Pour améliorer la réactivité sur le chantier, il est conseillé de privilégier des spécifications et contrôles à plus court terme (par exemple 7 jours et non 28). En cas de spécifications à 28 jours seulement, on propose d'utiliser comme valeurs de référence les mesures effectuées lors des essais de convenance.

6.6.1. Spécifications à 28 jours

<u>La résistance en compression</u>
--

Elle dépend des exigences du chantier. Toutefois, nous conseillons de ne pas dépasser la classe C30/37 et d'en rester, dans les cas courants, à la classe **C25/30**.

Elle est mesurée selon l'essai de la norme d'essai NF EN 12504-1 sur au moins cinq carottes de 60 mm de diamètre et 120 mm de hauteur, prélevées sur des dalles de béton projeté conformément à l'EN 14488-1 (épaisseur minimale de 15 cm).

Actuellement, avec le dosage minimum en ciment de 400 kg / m³ (qui reste recommandé), on obtient souvent des résistances bien plus élevées que les valeurs spécifiées. On attire toutefois l'attention sur le fait que cela est pénalisant pour la déformabilité du matériau. Il est donc nécessaire de vérifier en analysant les courbes d'absorption d'énergie que la rupture reste ductile.

Critères de conformité (sur au moins 5 éprouvettes Ø60 mm, élanement 2) :

- les deux valeurs extrêmes sont écartées ; la valeur moyenne sur les carottes restantes est supérieure ou égale à la valeur spécifiée.

La capacité d'absorption d'énergie

Elle dépend du contexte géologique et géotechnique. Elle doit être déterminée pour chaque projet. On peut toutefois donner des indications générales :

Tableau de spécification pour un béton type de classe C25/30 à C30/37 à 28 jours :

Application	Classe d'énergie d'absorption d'énergie minimum	Absorption d'énergie en J, pour une flèche de 25 mm
Béton projeté fonctionnant comme <u>peau protectrice</u> et pour des roches / sols solides	E500	500
Béton projeté fonctionnant comme <u>peau résistante</u> et pour des roches / sols moyens	E700	700

Au-delà d'un C30/37, les valeurs d'énergie doivent être supérieures et la ductilité de la rupture du béton vérifiée (cf. critères suivants). Ainsi, pour un béton C40/50, on peut proposer les prescriptions suivantes :

Application	Classe d'énergie d'absorption d'énergie minimum	Absorption d'énergie en J, pour une flèche de 25 mm
Béton projeté fonctionnant comme <u>peau protectrice</u> et pour des roches / sols solides	E800	800
Béton projeté fonctionnant comme <u>peau résistante</u> et pour des roches / sols moyens	E1000	1000

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 10 cm d'épaisseur (+ 5 mm, - 0).

Critères de conformité (sur au moins 3 dalles) :

- aucune valeur inférieure à l'énergie spécifiée.

En complément, nous proposons d'ajouter les spécifications suivantes :

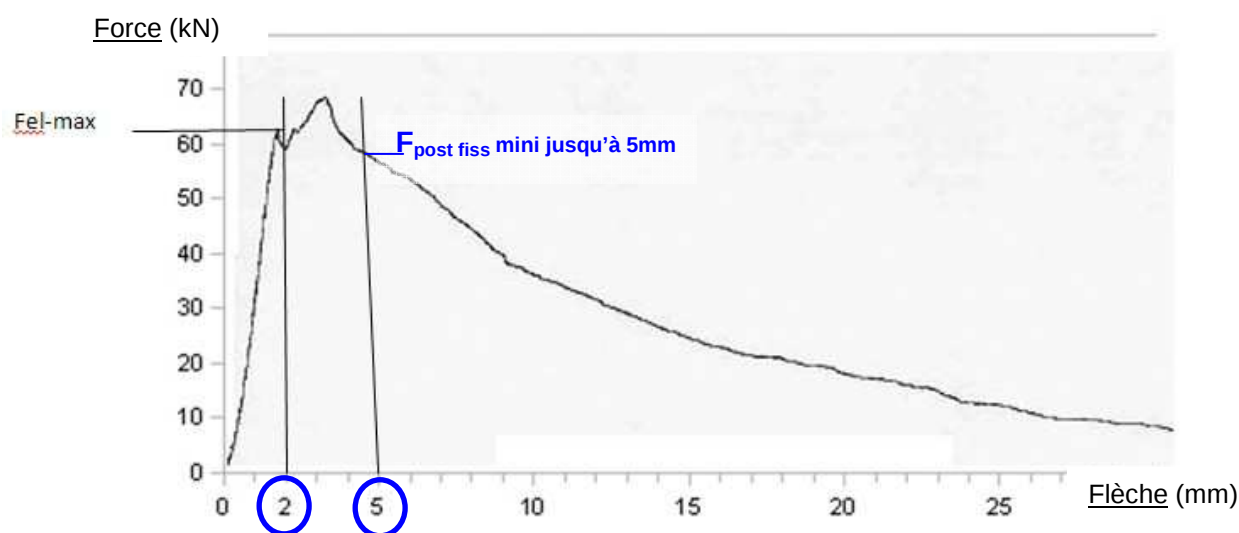
- Fabriquer 4 dalles par essais de poinçonnement/flexion (3 + 1 de secours) pour s'assurer d'avoir des moyennes sur au moins 3 valeurs.
- Les dalles ne respectant pas strictement l'épaisseur (10 cm, +5 mm -0) ou dont le fond n'est pas plan sont refusées. Pour éviter cela, un contrôleur doit être présent lors de la réalisation des caisses ;
- Les dalles doivent rester entières après l'essai.
- Les dalles doivent être multi-fissurées : pour le montrer, les rapports d'essais doivent comporter, en plus des exigences habituelles, les photos des faces inférieures de chaque dalle testée, après une éventuelle pulvérisation d'eau permettant de mieux mettre la fissuration en évidence.
- Afin de s'assurer de la qualité du béton fibré utilisé, les courbes charge-flèche doivent se rapprocher du faciès type présenté dans le *Graphe « Exemple »* ci-après ou dans la norme NF EN 14488-5. En complément¹¹, nous proposons d'inclure les conditions suivantes sur **chaque courbe** à analyser :

1. La charge maximale de la zone élastique (F_{el-max}) doit correspondre à une valeur de déformation inférieure à 2 mm.

2. La charge minimale après fissuration jusqu'à une flèche égale à 5 mm doit être supérieure à 70% de F_{el-max} (limite élastique), soit :

$$F_{post\ fiss\ mini\ jusqu'à\ 5mm} \geq 0,7 F_{el-max}^{12}$$

Le graphe suivant montre un exemple de courbe de chargement et positionne les valeurs introduites ci-dessus.

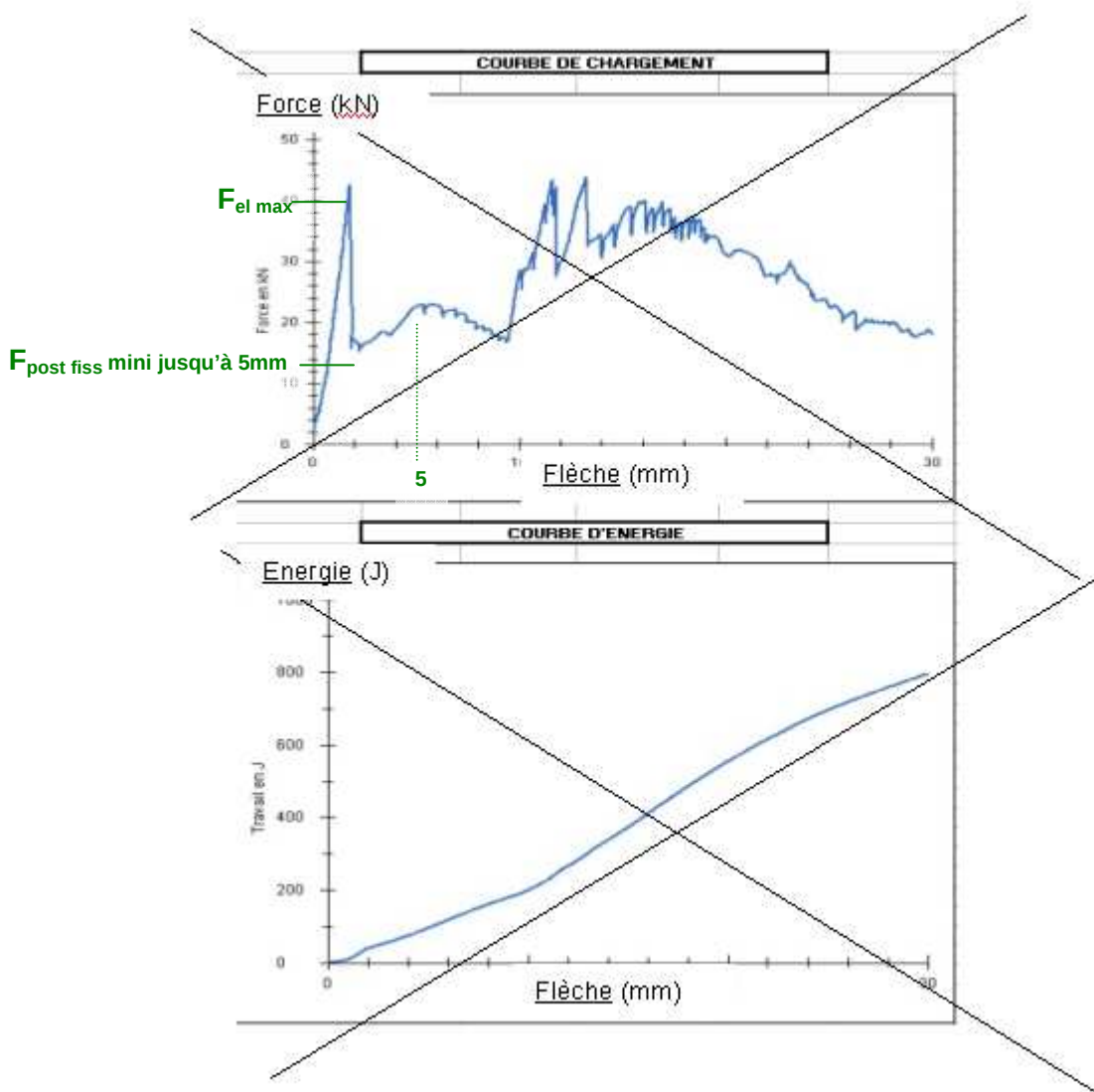


Graphe « Exemple »

¹¹ Ces propositions sont issues de l'étude des résultats d'un an d'essais réalisés par le laboratoire Sigma Béton sur différents types de bétons projetés fibrés.

¹² D'après l'étude d'un nombre assez important de courbes, cette valeur de 70% semble une valeur adaptée pour sélectionner des bétons de qualité, dans l'attente d'un plus grand nombre de retours d'expérience.

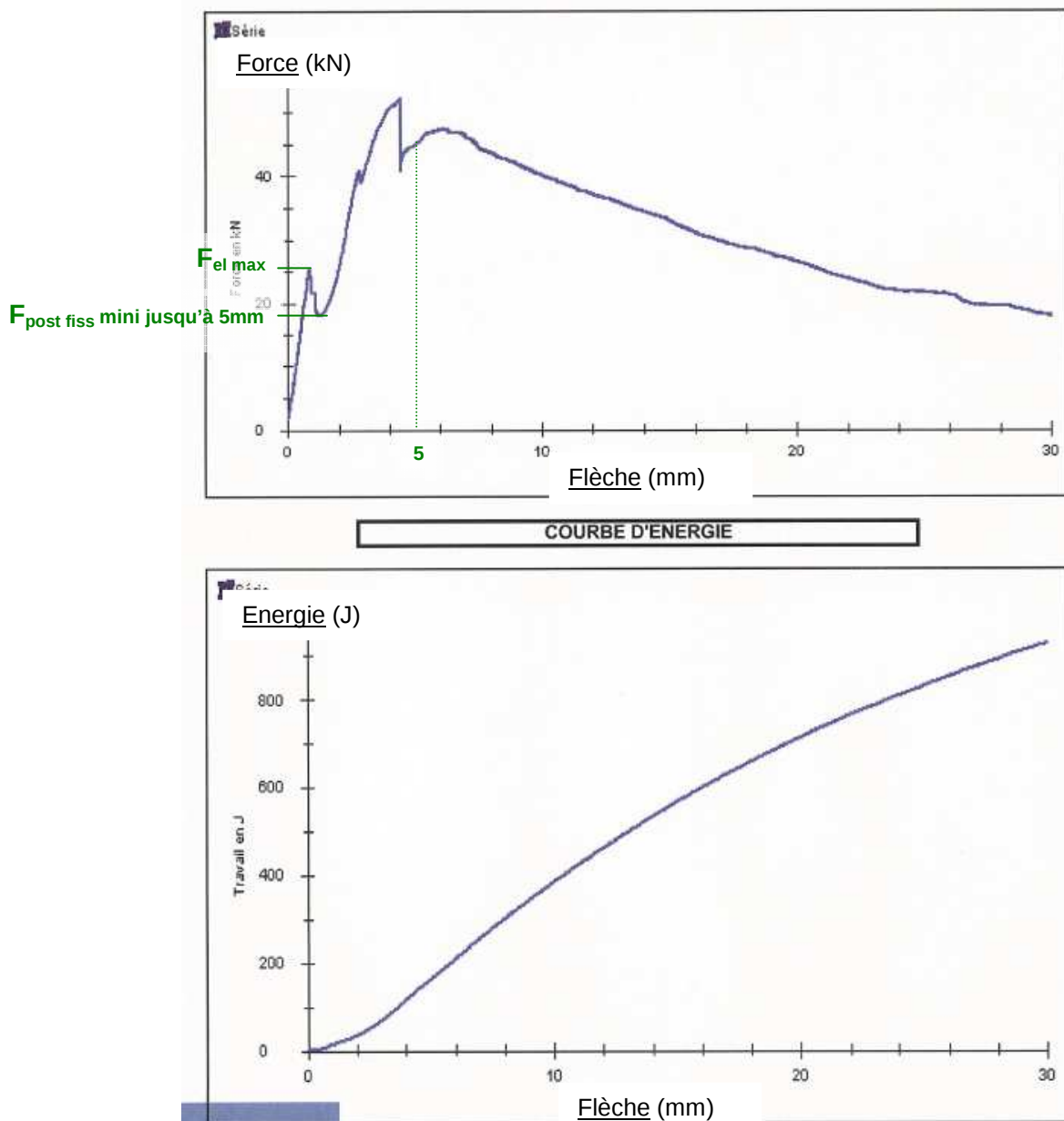
Les nouveaux critères proposés dans ce document doivent nous permettre de ne pas accepter des courbes du type suivant, dont l'énergie est pourtant > 700 J (cf exemple ci-dessous **non conforme** caractérisant une ouverture des fissure trop importante avant la mobilisation de l'ancrage des fibres).



La courbe du haut met en évidence une ouverture de fissure trop importante avant la mobilisation de l'ancrage des fibres

Lorsqu'on mesure des résistances en **compression élevées**, bien que non prescrites, il est nécessaire d'analyser les courbes d'essais en flexion pour vérifier la **non-fragilité du matériau**. Il peut être nécessaire d'augmenter le dosage en fibres mais ce n'est pas toujours le cas, comme l'illustre l'exemple ci-dessous.

À titre d'exemple, on présente ci-dessous les résultats obtenus selon la norme NF EN 14 488-5 sur un béton de résistance en compression moyenne de plus de 70 MPa à 28 jours (mesurée sur des cylindres 15*30). La plaque testée à 28 jours a donné 831 J (voir courbe ci-dessous) avec un dosage en fibres de 25 kg/m³ en place (mesuré sur béton durci selon la norme NF EN 14 488-7). Sur le même béton, projeté le même jour, la moyenne de trois essais d'absorption d'énergie à 7 jours a été de 764 J à 7 jours (669J, 699 J, 925 J) pour des dosages en fibres de 26, 26 et 29 kg/m³. Dans cet exemple, les valeurs à 7 jours dépassent les 90% des valeurs à 28 j.



*Rupture **non fragile** d'un béton **très résistant** avec un dosage en fibres courant*

6.6.2. Spécifications à 7 jours

Le maître d'œuvre peut spécifier, ou non, des valeurs à 7 jours.

Dans les deux cas, ces valeurs sont intéressantes pour gagner en réactivité lors de la mise au point de la formulation du béton fibré, lors des essais de convenance ou lors des contrôles en début de chantier.

On propose donc de mesurer systématiquement les caractéristiques du béton à 7 jours (compression et capacité d'absorption d'énergie) lors des essais de convenance. Ces valeurs peuvent ensuite être utilisées comme référence lors de certains essais de contrôle.

Les valeurs contractuelles restent celles qui sont demandées au CCTP.

À titre indicatif, les valeurs de résistance en compression et de capacité d'absorption d'énergie devraient être d'au moins 75 à 80% des valeurs à 28 jours.

6.6.3. Spécifications à 48 h

Le maître d'œuvre peut spécifier à 48 h la résistance moyenne en compression (à titre indicatif, de l'ordre de 10-11 MPa).

6.6.4. Spécifications au jeune âge (< 24 h)

La montée rapide en résistance est primordiale pour la sécurité des personnes et la cadence du chantier. Cependant les objectifs de résistance en compression au jeune âge (à titre indicatif exemple 3-4 MPa à 4 ou 8 h) relève de la responsabilité et du choix de l'entreprise.

Ils ne sont pas forcément spécifiées dans le CCTP.

Cette résistance peut être contrôlée par compression de cubes ou arrachement de clous filetés (selon la norme NF EN 14488-2).

6.7. Spécifications sur les contrôles de la teneur en fibres

On recommande de contrôler la teneur en fibres sur béton frais ou fraîchement projeté pour pouvoir réagir immédiatement en cas de résultats non conformes.

Les mesures sur béton durci gardent toute leur importance si les résultats de capacité d'absorption d'énergie ne sont pas satisfaisants. Elles permettent de préciser l'origine probable de la non-conformité.

6.7.1. Teneur en fibres sur béton fraîchement projeté

Méthodes de prélèvement :

Les contrôles doivent être faits sur béton fraîchement projeté. Les prélèvements sont faits de préférence sur parois et non dans les caisses, avec une coupelle de volume 1 litre immédiatement après la projection. Dans la mesure du possible, il faut éviter de diminuer le dosage en raidisseur pour faciliter le prélèvement car cela modifie les pertes. Le béton prélevé doit être immédiatement immergé pour éviter son durcissement.



Exemple de coupelle de prélèvement

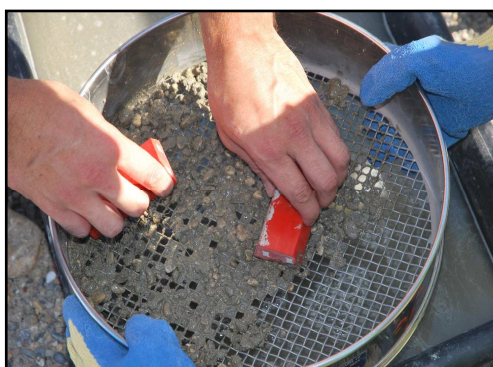
N.B 1: En voie mouillée les pertes en fibres sont moins élevées qu'en voie sèche. Les pertes sont à la fois composées de fibres et de pâte de ciment. On admet qu'il n'est pas réaliste de faire des prélèvements en voûte.

N.B 2: il faut faire attention à l'impact des fibres qui dépassent de la coupelle sur le résultat mesuré.

Méthodes de contrôle :

On utilise la méthode de l'essai normalisé NF EN 14 488-7 méthode B en dérogeant sur le poids du prélèvement (plus de 2 kg).

Le béton prélevé est placé dans un tamis pour lavage de sorte que les fibres puissent être séparées de la masse. Les fibres métalliques sont alors récupérées grâce à un aimant. Pour les fibres en polypropylène, l'échantillon est agité jusqu'à ce que les fibres flottent à la surface. Les fibres récupérées sont alors pesées.



Récupération de fibres métalliques (1)...



...et synthétiques (2)

6.7.2. Teneur en fibres sur béton durci

Ces essais sont réalisés en laboratoire sur les plaques préalablement testées en capacité d'absorption d'énergie. Un volume de béton d'environ 1 litre est prélevé et concassé pour récupérer les fibres, qui sont ensuite nettoyées et pesées. Le calcul de la teneur en fibres est fait à partir de la masse volumique de l'échantillon.

6.8. Programme de l'épreuve d'étude du béton fibré

L'épreuve d'étude, exécutée en laboratoire par 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 de plus et de moins 10 l,
- 2 gâchées dérivées de la formule nominale par la modification de la quantité de ciment de plus ou moins 20 kg de ciment par mètre cube de béton,
- éventuellement de gâchée dérivées de la formule nominale par la modification du dosage des adjuvants compatibles avec leur zone d'efficacité (si risque de forte altération de la rhéologie du béton liée aux variations saisonnières).

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

- la détermination de la durée pratique d'utilisation du béton par la mesure régulière de la consistance (essais d'affaissement au cône d'Abrams selon la NF EN 12350-2).

Le temps d'utilisation maximal ou d'ouvrabilité du béton (T_m) spécifié au CCTP doit pouvoir englober le temps de transport du béton de la centrale au chantier et le cycle d'avancement du poste de projection. Ce temps est le plus souvent estimé à 90 min (voire 120 min).

- un essai de détermination de la masse volumique du béton à T_m
- la confection de 3 éprouvettes (15*30 ou 16*32 cm) à 28 jours pour essais de résistance à la compression du béton. Il est possible d'y ajouter les mesures de résistance à d'autres échéances (ex : 3h, 12h, 2 ou 7 jours) selon les spécifications du CCTP.

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
- la confection de 3 éprouvettes (15*30 ou 16*32) pour essai de résistance à la compression du béton à 28 jours.

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

- les résultats des essais de consistance effectués sur toutes les formules sont comprises dans la fourchette spécifiée (ex : 190 mm +/- 30 mm pour la classe S4)
- les résultats des essais de résistances à la compression satisfont les exigences suivantes :

Pour la nominale :

$$f_{CE} \geq f_{Ck} + (C_E - C_{min})$$

et

$$f_{CE} \geq f_{Ck} + 2S$$

Pour les dérivées :

Dans la fourchette $f_{CE} \pm 15 \% f_{CE}$.

- Avec
- f_{CE} : Moyenne des mesures en compression des 3 éprouvettes à l'échéance k
 - f_{Ck} : Résistance caractéristique spécifiée à l'échéance k (ex : 25 MPa pour un C25/30 à 28 jours)
 - C_E : Résistance à la compression du ciment mesurée par le laboratoire à 28 j
 - C_{min} : Valeur minimale de la résistance à la compression sur le ciment donnée par le fournisseur (ex : 52,5 MPa pour un CEM I 52.5)
 - S : Ecart type prévisionnel de la distribution des résistances (au minimum égal à 3)

6.9. Programme de l'épreuve de convenance du béton fibré

Les essais - ou épreuve - de convenance consistent à fabriquer en centrale une gâchée répondant à la formule nominale de l'épreuve d'étude et à contrôler ses caractéristiques avant et après projection. Ils doivent être effectués par l'entrepreneur et sous sa responsabilité pour vérifier que le béton satisfait aux exigences du marché. Ils constituent un point d'arrêt.

Les essais de convenance doivent permettre de tester toute la chaîne de mise en œuvre du béton (fabrication, transport, mise en œuvre). Ils doivent être réalisés dans les conditions réelles de déroulement du chantier (mêmes matériels, matériaux, personnels).

Comme le fascicule 65 le prescrit pour les bétons coulés, il faut prévoir un délai suffisant pour permettre l'exécution et l'exploitation de ces essais et, en cas de résultats défavorables, procéder aux adaptations nécessaires et à une nouvelle épreuve.

Les essais portent notamment sur les paramètres suivants :

- 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,
- fonctionnement des installations de malaxage, de refoulement et de projection du béton,
- étalonnage de la pompe d'introduction du raidisseur et contrôle du système d'asservissement,
- technicité des opérateurs proposés par l'entrepreneur à l'agrément du maître d'œuvre.

Si besoin, on peut être amené à exécuter ces essais en 2 phases :

- une 1^{ère} phase, hors tunnel, pour vérifier l'obtention des caractéristiques mécaniques (consistance du béton frais, résistance en compression, capacité d'absorption d'énergie, dosage en fibres,
- une 2^{ème} phase, en tunnel, pour vérifier l'aptitude du projeteur à régulariser le relief et obtenir l'aspect de surface requis.

Avant projection, les contrôles concernent :

- la détermination de la durée pratique d'utilisation du béton (T0 à Tm) par mesure de la consistance du béton frais (a minimal pour le calage des contrôles continus),
- la détermination de la masse volumique du béton à Tm.
- la confection de 3 éprouvettes (15*30 ou 16*32) à 28 jours pour essais de résistance à la compression du béton. Il est possible d'y ajouter les mesures de résistance à d'autres échéances (ex : 3h, 12h, 2 ou 7 jours) selon les spécifications du CCTP.

Les critères de conformité sont les mêmes que ceux exigés pour l'épreuve d'étude de la formule nominale (cf ci-dessus).

Après projection, les contrôles portent sur les spécifications du CCTP et concernent donc généralement :

- 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...) ¹³,
- le prélèvement d'au moins 5 carottes (60*120 mm) pour essais de résistance à la compression du béton par échéances spécifiées dans le CCTP (à 2, 7 et 28 jours),
- la détermination du dosage en fibres sur béton fraîchement projeté,
- la fabrication de 4 caisses 60*60*10 cm pour au moins 3 mesures de la capacité d'absorption d'énergie du béton projeté fibré par échéances spécifiées dans le CCTP (à 7 ou 28 jours).

¹³ D'autre part, lorsque le temps de transport peut être variable, il faut prévoir des essais de projection après un temps d'attente en toupie correspondant à la durée d'ouvrabilité demandée afin de vérifier le maintien de la projectabilité et de la maniabilité du béton, comme on le fait pour le béton coulé.

Lors du carottage pour les essais de compression ou à leur réception, l'état des carottes doit être vérifié pour détecter un éventuel feuilletage dû à des variations de dosage de l'accélérateur (problème lié au matériel de projection).

Les critères de conformité sont ceux exigés dans le CCTP (ex : $E \geq 500$ J, $R_{c28} > 25$ MPa...).

L'épreuve de convenance est probante si tous les critères de conformités (avant et après projection) sont respectés.

Les essais de convenance font l'objet d'un rapport à soumettre à l'agrément du maître d'œuvre 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,
- les recommandations de l'Entrepreneur et de son laboratoire.

En général, mais la réflexion doit être conduite pour chaque chantier, il n'est pas nécessaire de vérifier :

- la valeur des pertes (le béton étant rémunéré au ml de profil type par application du nouveau fascicule 69 du CCTG « Les travaux en souterrain »),
- l'adhérence du béton sur la paroi rocheuse (très variable selon la nature de la roche, la présence d'eau, la température du support...).

Si les contrôles de conformité aux spécifications 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. On rappelle les délais nécessaires pour cela...

6.10. Périodicités des contrôles sur chantier

Les fréquences recommandées à ce jour par l'AFTES ou la normalisation européenne (tableau 12 de la norme NF EN 14487-1) sont malheureusement rarement respectées pendant toute la durée d'un chantier. On rappelle de plus que les valeurs mentionnées dans le tableau ci-après doivent théoriquement être multipliées par 4 en début de chantier jusqu'à obtention de 4 résultats successifs acceptables.

Cette problématique de respect des contrôles prévus n'est pas spécifique à l'utilisation des fibres, même si les contraintes de réalisation des dalles et le coût des essais de capacité d'absorption d'énergie renforcent les difficultés à suivre les programmes théoriques de contrôle.

La simplification des contrôles reste un sujet sensible qui fera l'objet d'un groupe de travail spécifique du WG 12 de l'AITES sur les bétons projetés. L'ASQUAPRO s'associera à ces réflexions et fera des propositions plus précises dans les mois à venir.

	Type d'essai	Inspection/essai conformément à	Soutènement		
			Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3
Contrôle du béton frais					
1	Rapport eau/ciment du béton frais lorsque la méthode du mélange mouillé est utilisée	Par calcul ou méthode d'essai			Quotidiennement
2	Accélérateur	Par calcul à partir de l'enregistrement de la quantité ajoutée			Quotidiennement
3	Teneur en fibres dans le béton frais	Conformément au prEN 14488-7	min 1	1/200 m³ ou 1/1 000 m²	1/100 m³ ou 1/500 m²
Contrôle du béton durci					
4	Essai de résistance du béton projeté jeune	prEN 14488-2	1/5 000 m² ou 1/2 mois	1/2 500 m² ou 1/mois	1/250 m² ou 2/mois
5	Résistance à la compression	EN 12504-1	1/1 000 m³ ou 1/5 000 m²	1/500 m³ ou 1/2 500 m²	1/250 m³ ou 1/1 250 m²
6	Densité du béton durci	EN 12390-7	Lorsque la résistance à la compression est évaluée		
7	Résistance à la pénétration d'eau	EN 12390-8			
8	Résistance au gel/dégel	voir la note d au bas du tableau			
9	Adhérence	EN 14488-4 ^{a)} EN 1542 ^{b)}		1/2 500 m²	1/1 250 m²
Contrôle du béton projeté renforcé par des fibres					
10	Teneur en fibres du béton durci ^{c)}	prEN 14488-7	Lorsque la résistance résiduelle ou la capacité d'absorption d'énergie est évaluée		
11	Résistance résiduelle ou capacité d'absorption d'énergie	prEN 14488-3 ou prEN 14488-5	1/2 000 m³ ou 1/10 000 m²	1/400 m³ ou 1/2 000 m²	1/100 m³ ou 1/500 m²
12	Résistance ultime à la flexion	prEN 14488-3	Lorsque la résistance résiduelle est évaluée		
13	Résistance à la flexion au premier pic	prEN 14488-3	Lorsque la résistance résiduelle est évaluée		

Extrait du tableau 12 de la norme NF EN 14487-1

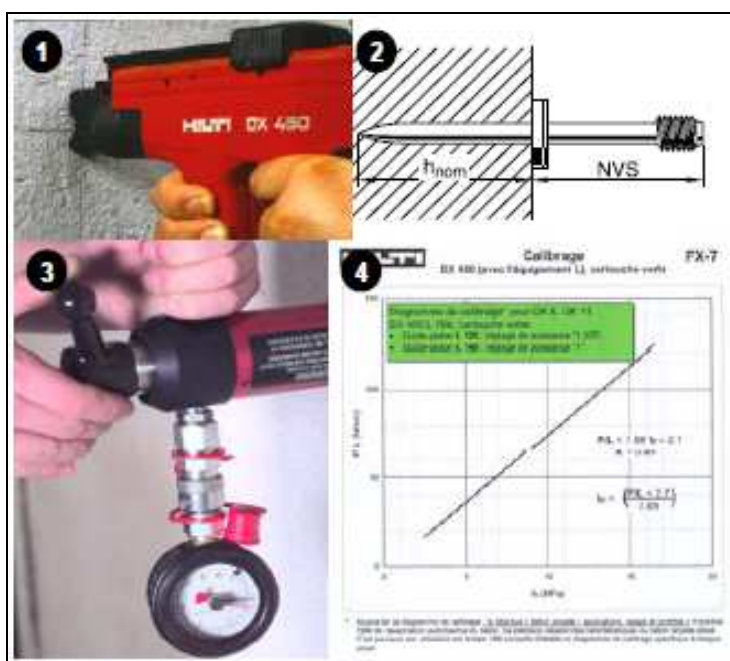
Des essais de **contrôle continu** sont nécessaires pour vérifier la qualité du béton. Pour cela, on préconise de privilégier des essais simples et rapides :

- avant projection : essai d'affaissement au cône d'Abrams ou utilisation d'un pénétromètre de poche tel que décrit dans le *fascicule ASQUAPRO « Contrôles – partie B »* (vérifier toutefois la faisabilité de la mesure pour les bétons fibrés) ou d'un plasticimètre manuel (vérifier la faisabilité pendant les épreuves de convenance).



Exemple de pénétromètre de poche pour VM (pompabilimètre) et de plasticimètre manuel

- après projection, au jeune âge (de 3h à 24h) : des essais d'arrachement de clous filetés (NF EN 14488-2)



Matériels « HILTI » d'arrachement

6.11. Intervenants sur chantier

Indépendamment de leur fréquence, les contrôles nécessitent, pour être représentatifs de la qualité du chantier, l'intervention de personnels qualifiés, tant pour les contrôles internes que pour les contrôles externes ou extérieurs.

Une très grande rigueur est nécessaire pour la réalisation des caisses destinées aux essais d'absorption d'énergie ; une sur-épaisseur d'un centimètre modifie sensiblement les résultats et faussent les valeurs moyennes obtenues. Les nouvelles exigences que nous proposons d'inclure dans les CCTP doivent permettre de **rejeter les dalles non conformes**. Nous attirons cependant l'attention sur la difficulté que représente la réalisation de dalles conformes (planéité et épaisseur de 10 cm, + 5 mm, -0). Ce point doit être vérifié au fur et à mesure de leur réalisation pour que le bon nombre d'échantillons soit disponible pour les essais.

6.11.1. Contrôleurs internes

Rappelons d'abord que le contrôle interne est à la charge de l'entreprise. Le maître d'œuvre lui demande donc de désigner le responsable du contrôle interne, malheureusement sans généralement exiger et obtenir que ce responsable connaisse bien la projection du béton.

Lorsque l'entreprise a une bonne pratique de la projection, elle peut choisir les responsables du contrôle interne parmi ses opérateurs certifiés ASQUAPRO, ou parmi ses chefs de chantiers qui ont déjà dirigé des travaux de béton projeté.

Dans ce cas, une formation conforme au référentiel ASQUAPRO peut être réalisée sur le chantier, en une seule journée pour apprendre à appliquer les procédures de contrôle, avant, pendant et après la projection.

Lorsque l'entreprise n'a pas la pratique de la projection, une formation préalable des contrôleurs internes qu'elle a désignés est indispensable. Il faut d'abord envisager une journée pour acquérir les connaissances de base sur le béton projeté et prendre en compte l'utilisation des fibres, ensuite une journée pour étudier les procédures de contrôle, rédiger celles particulières au chantier et apprendre à les appliquer.

Ces recommandations devraient permettre au maître d'œuvre de compléter ses prescriptions en exigeant de l'entreprise :

- qu'elle désigne un responsable du contrôle **compétent**,
- qu'elle note dans le Plan Qualité les procédures de contrôle avant, pendant et après projection.

AVANT	Vérifier l'état du support. Contrôler le béton à la sortie de la toupie (slump, pénétromètre ou plasticimètre).
PENDANT	Vérifier la technique de projection, le dosage de l'accélérateur.
APRES	Effectuer des contrôles au jeune âge avec des méthodes « légères » (sondage au marteau, essais d'arrachement de clous filetés).

6.11.2. Contrôleurs externes

Ceux sont des ingénieurs et techniciens de bureaux d'études techniques ou laboratoires, choisis et rémunérés par l'entreprise.

Avant de faire son choix, l'entreprise doit s'assurer qu'ils connaissent bien le béton projeté et sont équipés pour :

- carotter des éprouvettes Ø 60 et L 120 mm dans les caisses AFNOR (NF P 95-102),
- scier, surfacer ces éprouvettes et les écraser,
- mesurer la capacité d'absorption d'énergie d'une dalle fibrée (essai NF EN 14488-5)
- mesurer la teneur en fibres après projection (essai NF EN 14488-7)

- mesurer la résistance du béton aux échéances spécifiées dans le CCTP (essai NF EN 14488-2, etc.).

Les laboratoires, généralement très bien formés et équipés pour réaliser les essais sur béton coulé, ne le sont pas forcément pour le béton projeté, a fortiori fibré.

Leurs techniciens, notamment ceux devant se déplacer sur les chantiers pour aider ou contrôler les mesures ou prélèvements sur site, peuvent avoir besoin d'une formation. Cette dernière peut être organisée via l'ASQUAPRO.

6.12. Spécifications sur la préparation du support

Il n'y a pas de préparation spécifique en cas d'utilisation de fibres. Les dispositions prescrites pour les bétons projetés restent identiques (cf annexe 3 : *Extraits du fascicule ASQUAPRO « Mise en œuvre »*)

6.13. Spécifications sur la cure

Elles ne sont pas spécifiques aux bétons fibrés.

Avant le percement du tunnel permettant la création d'une ventilation naturelle (sans ventilation forcée), la cure n'est généralement pas faite sur les bétons de soutènement. Vu les difficultés qu'elle présente et le peu de problèmes posés par la fissuration de retrait pour ce domaine d'application, on admet qu'elle n'est pas indispensable pour les bétons de soutènement provisoire, d'autant plus que les fibres répartissent la fissuration.

Après percement complet du tunnel ou en cas de ventilation très forte, il peut être nécessaire de réaliser une cure pour éviter la dessiccation trop rapide du béton. Dans ce cas, la cure doit être faite pendant au minimum 3 jours, par arrosage en début et en fin de chaque poste (fréquence à adapter pour ajuster l'apport d'eau à son évaporation).

L'utilisation d'un produit de cure NF n'est possible que pour la dernière couche (risque de feuillete entre couches sinon). Il faut utiliser un produit en phase aqueuse pour des questions d'hygiène et sécurité en milieu confiné.

ANNEXE 1 : La classification « BARTON CHART »

5 ROCK MASS CLASSIFICATION

5.1 Objectives of rock mass classification systems in Norwegian tunnelling

A typical Norwegian tunnel is characterised by changing ground conditions, varying sections of good rock mass quality and sections of poorer quality. The primary objective of the use of rock mass classification systems is thus to qualify various engineering properties of, or related to, the rock mass. The classification system predominately used in Norwegian tunnelling is the Q-system, whilst others, such as RMR, RMI and GSI are used in few cases.

The output obtained from rock mass classification systems is typically related to:

1. Description of the rock mass expressed as quantified rock mass quality, incorporating the effects of different geological parameters. This enables the comparison of rock mass conditions throughout the site and delineation of regions of the rock mass from 'very good' to 'very poor', thus providing a map of rock mass quality boundaries.
2. Empirical design with support guidelines compatible with tunnel stability and excavation method. Traditionally, this is often seen as the major benefit from the use of rock mass classification systems.
3. Estimates of rock mass properties. Rock mass classification expressed as an overall rock mass quality has been found useful for estimating the in situ modulus of rock mass deformability and the rock mass strength to be used in different types of design calculations.

The classification systems also serve as checklists for geotechnical field- and tunnel mapping and for core logging.

5.2 The Q-method

The Q-system was developed by the Norwegian Geotechnical Institute in the early 1970's (Barton et al. 1974) and has earned recognition around the world. A major update was released in 1993 (Barton and Grimstad 1993), and a new update including a complete users handbook will be released in 2004. The Q-value can be calculated as follows:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

RQD	= degree of jointing (Rock Quality Designation)
J_n	= number for joint sets
J_r	= joint roughness number
J_a	= joint alteration number
J_w	= joint water reduction factor
SRF	= Stress Reduction Factor

The Q-system contains the experience obtained from more than 1000 case histories from existing tunnels, and an empirically based diagram showing the connection between Q-values and the support used in these cases has been constructed, see Figure 5.1. The diagram also includes Reinforced Ribs of Sprayed Concrete, a design which is partly based on numerical modelling.

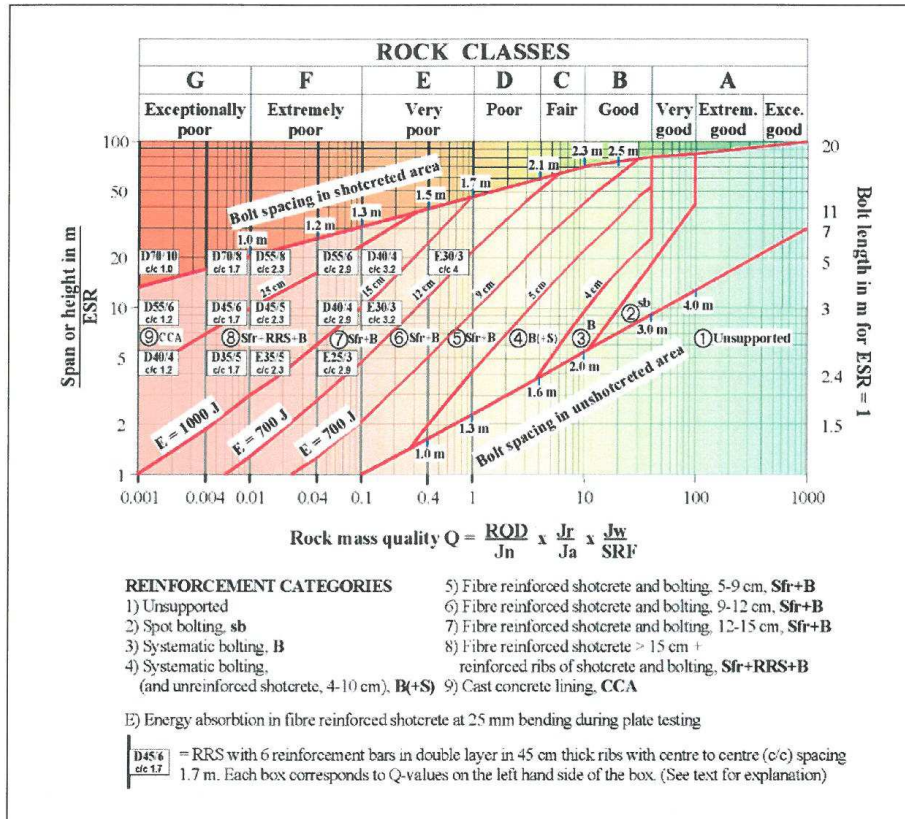


Figure 5.1. Q-values and support guidelines. (Grimstad et al 2002)

5.3 The RMI system

The RMI system has been developed primarily for improving the collection and use of geological parameters in rock engineering.

The rock mass index, RMI, is a volumetric parameter indicating the approximate uniaxial compressive strength of a rock mass. The RMI system was first presented by Palmström (1995) and have since been further developed and presented in several papers. It makes use of the uniaxial compressive strength of intact rock (σ_c) and the reducing effect of the joints penetrating the rock (JP) given as:

1. $RMI = \sigma_c \times JP$ for jointed rock masses. The jointing parameter (JP) is by empirical relations connected to the joint condition factor, jC, and the block volume, Vb. The joint condition, jC, can be estimated by the joint roughness, the joint alteration (similar to Jr and Ja in the Q-system) and the joint size.

2. $RMI = \sigma_c \times fs$ for massive rock having block size larger than approx. 5m³ (where $f_{\sigma} > JP$). The massivity parameter, f_{σ} , represents the scale effect of the uniaxial compressive strength (which from intact rock samples to massive rock has a value of approximately $f_{\sigma} \approx 0.5$).

The connection between the different inputs parameters applied in the RMI is shown in Figure 5.2.

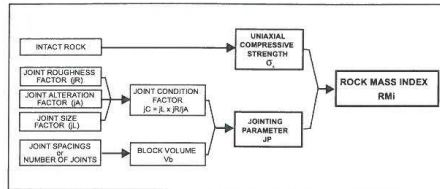


Figure 5.2. The input parameters to RMI (from Palmström, 1996)

The different input parameters can be determined by commonly used measurements and mapping and from empirical relationships presented by Palmström (2000). It requires more calculation than the Q-system and RMR system, but spreadsheets can be used to derive the RMI value.

Based on a characterisation of the rock mass by RMI, combined with geometrical features of the opening and ground factors like rock stresses, different rock engineering issues such as relevant rock support can be estimated using support charts. The charts have been developed from experience of more than 25 different projects and locations. Possible use of the system is shown in Figure 5.3.

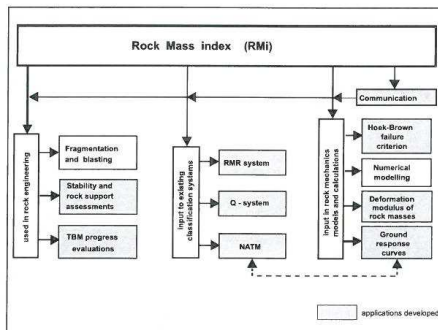


Figure 5.3. Possible applications of RMI (from Palmström, 1996)

5.4 Experience on the use of rock mass classification systems

A major contribution of the classification systems for use in underground tunnelling is that they provide a way of quantifying the quality and capability of the rock mass, which can be understood in a global context. Their exactness is not of interest in decimals. With careful and respectful application we have learned in Norway that such systems serve as useful tools both in design and construction. Being used in combination with other classification systems and together with; engineering judgement; analytical and numerical analysis, monitoring and observation of the tunnel behaviour, the tunnelling engineer has a powerful toolbox at hand. It is important to keep in mind that the appropriate application of these systems, both during the design and construction phases are when they are being considered as guidelines and recommendations. Site specific considerations and modifications are needed to enable the most appropriate application of any of these classification systems.

It is important to keep in mind that the classification systems have some limitations. The systems characterise the rock mass stability, but not the stability of individual blocks. That means that even in rock mass where the system states good stability, individual blocks may be unstable. Concerning the Q-system it must be stated that most of the case histories are from hard rocks in Scandinavia. In soft rocks, other methods such as deformations measurements and numerical modelling should be used in addition.

The systems are often used for other applications than rock mass stability, such as calculation of different rock mechanical parameters. The results from such calculations should only be considered as rough estimates. However, since it is often difficult to carry out exact field measurements of such parameters, calculations by using the classification systems are often the best assessments the rock engineers can perform.

ANNEXE 2 : Autres essais de caractérisation des bétons projetés

1. Résistance à la flexion 3 points sur dalles rondes (Essai ASTM C 1550)

C'est un essai isostatique réalisé sur des dalles rondes de 800 mm de diamètre. Le mode de fissuration est déterminé (3 fissures correspondant à la position des 3 appuis). L'énergie est évaluée pour une flèche de 5 mm pour les travaux de génie civil, pour une valeur supérieure pour les travaux souterrains (ex : 10 mm pour le soutènement provisoire des tunnels, 40 mm pour les mines).

Cet essai est une alternative à un essai de poutre en flexion 4 points. Mais il ne permet PAS :

- ✓ de simuler le comportement et le mode fissuration du béton fibré (multi-fissuration) comme le font l'essai de dalle selon la norme NF EN 14488-5 ou la dalle ronde de la norme norvégienne, en appui hyperstatique.
- ✓ de faire des corrélations avec les joules obtenues avec l'essai de capacité d'absorption d'énergie (EN 14488-5).

On ne retient pas cet essai pour les spécifications des soutènements provisoires.

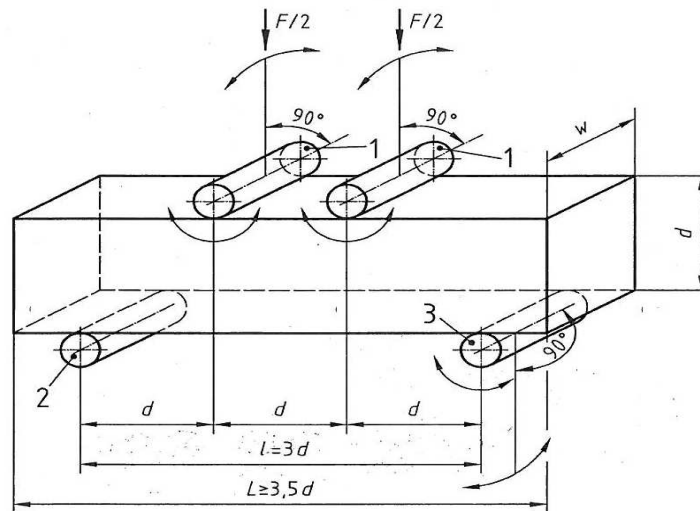


Essai de flexion 3 points sur dalles rondes

2. Résistance à la flexion 4 points sur poutre (NF EN 14488-3)

Cet essai isostatique est à l'origine destinés aux bétons fibrés mis en œuvre par coulage mais il a été adapté au béton projeté en réalisant les éprouvettes par sciage dans des dalles projetées. Cet essai permet d'évaluer la ductilité par examen de 3 résistances résiduelles successives.

Une éprouvette en forme de prisme (125 x 75 x 500 mm), renforcée par des fibres et sciée dans un panneau d'essai, est soumise à un moment de flexion en appliquant une charge par l'intermédiaire de rouleaux supérieurs et inférieurs en contrôlant la flèche afin d'obtenir la courbe charge / flèche.



Les résistances à la flexion au premier pic et ultimes sont calculées ainsi que les résistances résiduelles à 1, 2, 4 mm de flèche à mi-portée.

Les résultats sont plus dispersés que l'essai de flexion 3 points sur prismes entaillés.

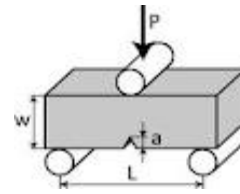
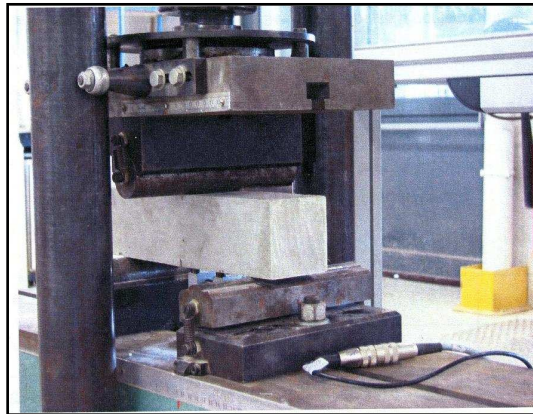
Cet essai est utile lorsque le béton projeté est utilisé pour des applications structurelles non temporaires.

On ne retient pas cet essai pour les spécifications des soutènements provisoires.

3. Mesure de la résistance à la traction par flexion du béton de fibres métalliques (limite de proportionnalité, résistance résiduelle) (NF EN 14651+A1)

Cette norme européenne spécifie une méthode de mesure, sur éprouvettes prismatiques moulées, de la résistance à la traction par flexion des bétons de fibres métalliques. La méthode permet de déterminer la limite de proportionnalité (LOP) et un ensemble de valeurs de la résistance résiduelle à la traction par flexion. Elle est conçue pour des fibres métalliques d'une longueur maximale de 60 mm. La méthode peut également être appliquée pour une combinaison de fibres métalliques et pour une combinaison de fibres métalliques avec d'autres fibres.

Le comportement en traction par flexion du béton de fibres métalliques est évalué en appliquant une charge ponctuelle centrée sur un prisme entaillé simplement appuyé.

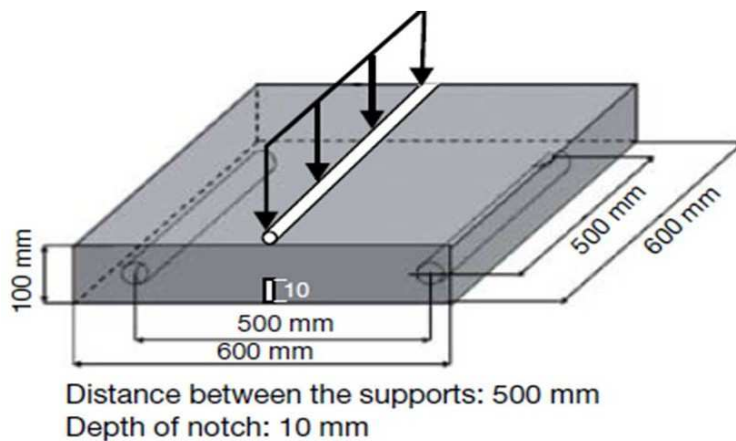


Essai de flexion 3 points sur prisme entaillé

Cet essai isostatique est bien adapté aux bétons coulés (éprouvettes moulées). Il ne met pas en évidence le phénomène de fluage, qui doit être évalué différemment. Il est retenu par le « Model Code » pour le calcul des applications structurelles. Il permet de définir la performance minimale requise pour considérer que les fibres remplacent tout ou partie des armatures du béton.

4. Essai de la résistance à la traction par flexion 3 points sur dalle entaillée

Pour les bétons projetés, l'EFNARC¹⁴ a proposé une méthode très similaire à la norme NF EN 14651 mais réalisée sur la même plaque que celle de l'essai d'absorption d'énergie (échantillon carré de 600 mm de côté et 100 mm d'épaisseur, entaillé, appuyé sur deux côtés).



¹⁴ European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems



Essai de flexion 3 points sur dalle entaillée

Cet essai est utile lorsque le béton projeté est utilisé pour des applications structurelles non temporaires (par exemple soutènement définitif).

On ne retient donc pas cet essai pour les spécifications des soutènements provisoires.

5. Remarque sur la résistance en traction par fendage

Elle ne doit PAS être déterminée par un essai de fendage selon la norme NF EN 12390-6. Cet essai, qui consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse, donne des valeurs trop optimistes car l'aplatissement de la génératrice transforme l'essai de traction en essai de compression.

La résistance en traction n'est généralement pas spécifiée dans les marchés de soutènement de tunnels. Si on souhaite le faire, il faut la mesurer suivant la norme EN 14488-4+A1.

ANNEXE 3 : Préparation du support

Extrait du fascicule ASQUAPRO « Mise en œuvre »

Parois rocheuses recevant un béton de soutènement

Cette rubrique concerne :

- ✓ les soutènements temporaires ou permanents pour des talus rocheux terrassés en déblais ou remblais (talus d'autoroute, de voie ferrée, de plate-forme industrielle)
- ✓ les soutènements temporaires ou permanents sur parois rocheuses en souterrain (tunnel, puits, cavités)
- ✓ les soutènements temporaires ou permanents dans le cadre d'ouvrages de type bassin, piscine, parking souterrain, etc.
- ✓ le confortement de tunnels non revêtus (associé à du boulonnage)

Dans ces types de soutènement, le béton projeté est associé soit à des ancrages métalliques ou composites (parois clouées), soit à des profilés métalliques (tubes, poutrelles pour paroi berlinoise), soit à des cintres, des armatures ou treillis métalliques éventuellement associés à des boulons d'ancrages (travaux souterrains). On se reportera, pour les prescriptions particulières de mise en œuvre, aux documents produits par l'AFTES ou par le projet national CLOUTERRE.

Le paramètre « qualité de l'adhérence au support » n'est pas prépondérant, mais l'objectif recherché reste cependant l'obtention d'un contact béton - paroi le plus homogène possible.

En règle générale, il est recommandé de traiter la paroi dans les délais les plus brefs après le terrassement, si besoin par projection d'une première passe de confinement.

La préparation d'un terrain fraîchement excavé se limite à :

- ✓ une purge des éléments instables,
- ✓ une humidification en fonction de la nature et de l'état des matériaux.

Si le déroctage est ancien, en cas d'altération de surface, un décapage complémentaire (balayage, soufflage) peut s'avérer nécessaire pour nettoyer la paroi avant humidification.

L'état de la paroi doit faire l'objet d'un examen détaillé, en particulier en cas de venue d'eau.

Parois en terrain meuble recevant un béton de protection ou de soutènement

De manière identique aux parois rocheuses, la préparation des parois en terrain meuble recevant un béton de protection ou un soutènement provisoire ou définitif suppose :

- ✓ la purge des éléments instables,
- ✓ une humidification préalable adaptée aux caractéristiques des sols à soutenir.

Dans certains terrains de tenue très médiocre, il est nécessaire de projeter immédiatement une peau de confinement directement sur la paroi « brute d'excavation » pour éviter la décohéssion à court terme du terrain.