



**Qualité du BP
fascicule 5**

**Contrôles
partie A**

Problématique des contrôles et description des méthodes d'essais



**Carottage en voûte pour mesure de l'adhérence du béton projeté au support
(NF EN 144888-4)**

VERSION DE MAI 2013

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	5
INTRODUCTION	6
DOCUMENTS DE REFERENCE	6
DOCUMENTS SPÉCIFIQUES AU BÉTON PROJETÉ	6
Norme AFNOR.....	6
Essais normalisés (NF EN & EN).....	7
Recommandations AFTES.....	7
NORMES CONCERNANT LE BETON UTILISABLE POUR LA PROJECTION	8
Normes européennes homologuées par l'afnor (NF EN).....	8
Essais NON normalisés « NF EN » utilisables pour le béton projeté	8
1 PROBLÉMATIQUE DU CONTRÔLE DU BÉTON PROJETÉ	9
1.1 PARTICULARITÉS DUES À LA MISE EN ŒUVRE PAR PROJECTION	9
1.1.1 Modification de la composition du béton.....	9
1.1.2 Epaisseur de la couche projetée.....	9
1.1.3 Présence d'armatures	9
1.1.4 Présence de fibres.....	9
1.2 HISTORIQUE DU CONTRÔLE.....	10
1.3 PROBLÈMES RENCONTRÉS	11
1.3.1 Pour les deux méthodes de projection	11
1.3.1.1 Différence de composition avant et après projection	11
1.3.1.2 Couche de faible épaisseur ou ferrillée	11
1.3.1.3 Enrobage des armatures.....	11
1.3.2 Particularités dues à la voie sèche	12
1.3.3 Problèmes propres à la projection par voie mouillée à flux dense	13
1.3.3.1 Pour le béton frais	13
1.3.3.2 Pour le béton durci	13
1.3.4 Problèmes propres à la projection par voie mouillée à flux dilué	14
1.3.5 Problèmes propres aux bétons renforcés par des fibres	14
1.3.5.1 Teneur en fibres après projection	14
1.3.5.2 Essais sur béton durci	14
2 DESCRIPTION DES ESSAIS	15
2.1 PRÉSENTATION	15
2.2 ESSAI NF P 95-102 DE RESISTANCE A LA COMPRESSION.....	15
2.2.1 Extrait de la norme NF P 95-102.....	15
2.2.2 Commentaires sur l'essai	16
2.3 ESSAIS NORMALISÉS SPÉCIFIQUES AU BÉTON PROJETÉ.....	17
2.3.1 NF EN 14488-1 : Echantillonnage de béton frais et de béton durci	17
2.3.2 NF EN 14488-2 : Essais de résistance à la compression au jeune âge.....	18
2.3.2.1 Pourquoi de tels essais ?	18
2.3.2.2 Principe des essais sur le béton jeune.....	19
2.3.2.2.1 Pénétration d'une aiguille (essai A)	19
2.3.2.2.2 Enfouissement et arrachement d'un clou fileté (essai B)	19
2.3.3 NF EN 14488-3 beton projete fibre - essai en flexion sur Prisme.....	20
2.3.3.1 Pourquoi un tel essai ?	20
2.3.3.2 Principe de l'essai.....	21
2.3.4 NF EN 14488-4 Essais pour béton projeté : adhérence en traction directe	22
2.3.4.1 Pourquoi un tel essai ?	22
2.3.4.2 Principe de l'essai.....	23
2.3.5 NF EN 14488-5 capacité d'absorption d'énergie d'une dalle fibrée	24
2.3.5.1 Pourquoi un tel essai ?	24

Principe de l'essai.....	24
Figure 1 de la norme.....	25
Figure 2 et 3 de la norme.....	25
2.3.6 NF EN 14488-6 mesure de l'épaisseur du béton sur un support	26
2.3.6.1 Commentaire.....	26
2.3.7 NF EN 14488-7 teneur en fibres du béton projeté fibré.....	26
2.3.7.1 Pourquoi un tel essai ?	26
2.3.7.2 Principe de l'essai.....	27
Méthode A (sur béton durci)	27
Méthode B (sur béton frais)	27
2.4 ESSAIS NORMALISÉS NON SPÉCIFIQUES AU BÉTON PROJETÉ.....	28
2.4.1 Essais sur béton frais	28
2.4.1.1 Essais avant projection	28
2.4.1.1.1 Cas de la voie sèche	28
2.4.1.1.2 Cas de la voie mouillée à flux dense	29
Mesure de la teneur en eau	29
Mesure de la masse volumique	29
Mesure de l'affaissement	29
Mesure de l'étalement au cône d'Abrams.....	30
Utilisation du maniabilimètre LCPC.....	30
Mesure de la teneur en air occlus	30
2.4.1.1.3 Cas de la voie mouillée à flux dilué :	31
2.4.1.2 Essais sur béton frais après projection :	31
2.4.2. Essais sur béton durci.....	31
2.5 ESSAIS NON NORMALISÉS UTILISÉS POUR LE BÉTON PROJETÉ	32
2.5.1 Essais sur béton frais spécifiques au béton projeté	32
2.5.1.1 Mesure de la masse volumique après projection.....	32
2.5.1.1.1 Cas de la voie sèche :	32
2.5.1.1.2 Cas de la voie mouillée :	33
2.5.1.2 Mesure de la consistance.....	33
2.5.1.2.1 Cas de la voie sèche :	33
2.5.1.2.2 Cas de la voie mouillée :	34
2.5.2 Essais sur béton frais non spécifiques au béton projeté.....	35
2.5.2.1 Mesure de la consistance du béton frais.....	35
2.5.2.1.1 Essai utilisant un « plasticimètre » à palettes.....	35
2.5.2.1.2 Essai utilisant un « Pompabilimètre ».....	36
2.5.2.1.3 Autres essais	37
2.5.3 Essais sur béton durci non spécifiques au béton projeté.....	37
2.5.3.1 Essais non destructifs sur chantier	37
2.5.3.1.1 Sondage sonique au marteau	37
2.5.4 Essais sur béton durci spécifiques au béton projeté	38
2.5.4.1 Résistance aux très jeunes âges	38
2.5.4.1.1 Procédure R.I.G. (Résistance Initiale Garantie)	38
3. FREQUENCES MINIMALES DES CONTRÔLES	39
CATÉGORIES D'INSPECTION	39
3.1.1 Tableau A1	39
3.1.2 Tableau A2	40
3.1.3 Tableau A3	40
3.1.4 Tableau A4	40

AVANT-PROPOS

Les neuf normes européennes concernant le béton projeté ayant été homologuées NF EN par l'AFNOR depuis seulement la fin de l'année 2006, la rédaction du présent fascicule, largement entamée au début des années 2000, a été entièrement reprise en 2007.

Compte tenu du grand nombre d'essais à décrire, à étudier et à commenter, il a été décidé à cette époque, de scinder le fascicule « Contrôles » en deux parties :

- Partie A :
Problématique des contrôles, description et principes des méthodes d'essais
- Partie B :
Réalisation sur site et exploitation des essais de contrôle, conseils pour le choix des essais.

Nous présentons ici la nouvelle version actualisée de la partie A du fascicule "Contrôles".

Cette version " 2013 " conserve le plan général de celle de 2007 mais comporte quelques modifications dues en particulier à l'apparition de nouvelles normes concernant les bétons auto-plaçants, que l'on peut utiliser pour le contrôle du béton projeté **par voie mouillée**.

Les pages des documents de référence ont donc été modifiées et améliorées grâce à Daniel Poineau, consultant et membre rédacteur du comité de pilotage des guides du STRRES, qui a rédigé une liste exhaustive des normes actuelles pouvant être utilisées pour les contrôles des bétons.

Pour le guide technique d'ASQUAPRO, seules les normes concernant les essais de contrôle internes et externes des **bétons projetés**, citées dans le présent fascicule A, ont été listées.

Par ailleurs, d'autres modifications concernant les essais ont été faites dans la version 2013 du fascicule A par rapport à sa version 2007.

Par exemple, l'essai NF EN 12350-5 d'étalement à la table à chocs, rarement utilisé dans les laboratoires et jamais sur les chantiers, a été supprimé et remplacé par l'essai NF EN 12350-8 : étalement au cône d'Abrams, très facile à exécuter sur chantier.

INTRODUCTION

La particularité du béton projeté étant essentiellement son mode de mise en œuvre, les méthodes d'essai pour contrôler sa qualité sont les mêmes, à la confection des échantillons près, que celles utilisées pour les bétons coulés.

Pendant très longtemps, les contrôles se sont limités à l'inspection des matériaux et des matériels utilisés, au respect de la composition prescrite pour le mélange, à l'examen de l'aspect de surface après projection, à la mesure de l'épaisseur projetée et au contrôle de l'adhérence par sondage au marteau.

Actuellement, différents essais permettent de vérifier avant, pendant et après les travaux, certaines caractéristiques du béton frais (venant d'être projeté) et les performances du béton durci.

Les essais sont divisés en :

- contrôles internes réalisés par l'entreprise suivant des méthodes et des fréquences décrites dans son Plan d'Assurance Qualité.
- contrôles externes réalisés soit par une entité de l'entreprise indépendante de l'exécution des travaux, soit par un organisme extérieur rémunéré par l'entreprise.
- contrôles extérieurs réalisés par un organisme indépendant rémunéré par le maître d'ouvrage.

DOCUMENTS DE REFERENCE

Le présent fascicule se réfère aux normes ou recommandations en vigueur. Pour les références datées, seule l'édition datée s'applique. Pour les références non datées c'est la dernière édition connue qui est prise en compte.

DOCUMENTS SPECIFIQUES AU BETON PROJETE

Norme AFNOR

NF P 95-102 avril 2002

Ouvrages d'art

**Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Béton projeté
Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés**

Cette norme n'est pas en contradiction avec les normes NF EN ci-après et elle donne des informations très utiles sur les courbes granulaires des mélanges qui n'apparaissent pas dans la NF EN 14487-1. Elle est donc toujours utilisée.

Essais normalisés (NF EN & EN)

<i>NF EN 14487-1</i>	<i>mars 2006</i>	Béton projeté <i>Partie 1 : définitions, spécifications et conformité</i>
<i>NF EN 14487-2</i>	<i>avril 2006</i>	Béton projeté <i>Partie 2 : Exécution</i>
<i>NF EN 14488-1</i>	<i>octobre 2005</i>	Essais pour béton projeté <i>Partie 1 échantillonnage de béton frais et de béton durci</i>
<i>NF EN 14488-2</i>	<i>octobre 2006</i>	Essais pour béton projeté <i>Partie 2 : résistance à la compression au jeune âge du béton projeté</i>
<i>NF EN 14488-3</i>	<i>juillet 2006</i>	Essais pour béton projeté <i>Partie 3 : résistances à la flexion (au premier pic, ultime et résiduelle) d'éprouvettes parallélépipédiques en béton renforcé par des fibres.</i>
<i>NF EN 14488-4</i>	<i>octobre 05</i>	Essais pour béton projeté <i>Partie 4 : adhérence en traction directe sur carottes</i>
<i>NF EN 14488-5</i>	<i>juillet 2006</i>	Essais pour béton projeté <i>Partie 5 : détermination de la capacité d'absorption de l'énergie d'une dalle-éprouvette renforcée par des fibres</i>
<i>NF EN 14488-6</i>	<i>juin 2006</i>	Essais pour béton projeté <i>Partie 6 : épaisseur du béton sur un support</i>
<i>NF EN 14488-7</i>	<i>juillet 2006</i>	Essais pour béton projeté <i>Partie 7 : teneur en fibres du béton renforcé par des fibres</i>
<i>NF EN 934-1</i>	<i>avril 2008</i>	Adjuvants pour béton, mortier et coulis <i>Partie 1 : exigences communes</i>
<i>NF EN 934-5</i>	<i>décembre 2007</i>	Adjuvants pour béton, mortier et coulis <i>Partie 5 : adjuvants pour bétons projetés : définitions, exigences et conformité, marquage et étiquetage</i>

Recommandations AFTES

<i>AFTES 1979 :</i>	<i>La méthode de construction des tunnels avec soutènement immédiat par béton projeté et boulonnage</i>	<i>TOS n° 31</i>
<i>AFTES 1993 :</i>	<i>La technologie et la mise en œuvre du béton projeté</i>	<i>TOS n° 117</i>
<i>AFTES 1994 :</i>	<i>La technologie et la mise en œuvre du béton projeté renforcé de fibres</i>	<i>TOS n° 126</i>
<i>AFTES 2001 :</i>	<i>Conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains</i>	<i>TOS n° 164</i>

NORMES CONCERNANT LE BETON UTILISABLE POUR LA PROJECTION**Normes européennes homologuées par l'afnor (NF EN)**

NF EN 206-1	avril 2004	Béton	Partie 1		
		Spécification, performances, production et conformité			
NF EN 206-1/A1	avril 2005	Béton	Partie 1		
		Spécification, performances, production et conformité (amendement 1 à la norme NF EN 206-1)			
NF EN 206-1/A2	octobre 2005	Béton	Partie 1 :		
		Spécification, performances, production et conformité (amendement 2 à la norme NF EN 206-1)			
NF EN 206-1/CN	décembre 2012	Béton	Partie 1 :	Spécification, performances, production et conformité (complément national à la norme NF EN 206-1)	
NF EN 12350-1		Essai pour béton frais	Partie 1	Prélèvement	avril 2012
NF EN 12350-2		Essai pour béton frais	Partie 2	Essai d'affaissement	avril 2012
NF EN 12350-6		Essai pour béton frais	Partie 6	Masse volumique	avril 2012
NF EN 12350-7		Essai pour béton frais	Partie 7	Teneur en air Méthodes de la compressibilité	avril 2012
NF EN 12350-8		Essai pour béton frais	Partie 8	Essai d'étalement au cône d'Abrams	nov. 2010
NF EN 12350-9		Essai pour béton frais	Partie 9	Essai d'écoulement à l'entonnoir en V	novembre 2010
NF EN 12390-5		Essai pour béton durci	Partie 5	Résistance à la flexion sur éprouvettes	avril 2012
NF EN 12390-7		Essai pour béton durci : Partie 7		Masse volumique	septembre 2001
NF EN 12390-8		Essai pour béton durci : Partie 8		Profondeur de pénétration d'eau sous pression	avril 2012
NF EN 14889-1		Fibres pour béton - Partie 1 : fibres d'acier		Définitions, spécifications et conformité	novembre 2006
NF EN 14889-2		Fibres pour béton - Partie 2 : fibres de polymère		Définitions, spécifications et conformité	novembre 2006
NF EN 12504-1		Essais pour béton dans les structure – Partie 1 : carottes		Prélèvements, examens et essais de résistance à la compression	avril 2012

Essais NON normalisés « NF EN » utilisables pour le béton projeté

- *Mesure de la teneur en eau du béton frais après projection*
- *Mesure de la teneur en ciment et fines du béton frais après projection*
- *Mesure de la consistance au pénétromètre du béton frais après projection (voie sèche)*
- *Mesure de l'ouvrabilité au maniabilimètre du LCPC (voie mouillée) NF P 18-452*
- *Estimation de la consistance du béton frais au plasticimètre à palettes manuel (voie mouillée)*
- *Sondage sonique au marteau sur béton durci pour contrôler l'adhérence au support*

1 PROBLEMATIQUE DU CONTROLE DU BETON PROJETE

1.1 PARTICULARITES DUES A LA MISE EN ŒUVRE PAR PROJECTION

1.1.1 Modification de la composition du béton

Du fait de la perte par rebond d'une partie des granulats, la projection, notamment lorsqu'elle est faite par voie sèche, augmente la teneur en ciment du béton en place et, par conséquent, sa résistance.

Lorsqu'un accélérateur de prise est introduit dans le jet de projection, il modifie également la composition et les performances du béton.

La composition du béton en place étant différente de celle du mélange introduit dans la machine, il est indispensable de fabriquer ou prélever les échantillons destinés aux essais dans du béton mis en œuvre par projection car la confection d'échantillons ou d'éprouvettes par coulage dans des moules ne serait pas représentative.

1.1.2 Epaisseur de la couche projetée

Pour de nombreuses applications du béton projeté (par exemple les réparations d'ouvrages ou les rejointoiements), la couche mise en place n'a pas une épaisseur suffisante pour y pratiquer des prélèvements carottés permettant d'obtenir des éprouvettes cylindriques pouvant être soumises à des essais de résistance à la compression.

1.1.3 Présence d'armatures

Lorsque des épaisseurs importantes de béton sont projetées (par exemple pour des soutènements), le béton est généralement armé par une ou plusieurs nappes d'armatures. Les carottages in situ exempts d'aciers sont relativement difficiles à réaliser et le risque de couper des armatures n'est pas nul.

1.1.4 Présence de fibres

La projection du béton se faisant toujours contre une paroi (ouvrage, coffrage, rocher,...), la disposition des fibres (quelle que soit leur nature) à l'intérieur du béton projeté n'est pas totalement aléatoire.

Les fibres ont en effet tendance à se placer dans des plans successifs parallèles à la paroi mais de manière aléatoire dans chacun de ces plans.

Cette disposition "semi aléatoire" est, pour ce qui concerne la résistance à la traction ou à la flexion d'un élément de structure, un avantage ou un inconvénient selon la direction de la sollicitation principale dans cet élément.

Cette particularité doit être prise en compte pour prescrire les contrôles.

1.2 HISTORIQUE DU CONTROLE

Pendant très longtemps, la conformité aux prescriptions de la composition du mélange et l'examen de l'aspect de surface après projection ont été les seuls contrôles pratiqués.

Aux Etats-Unis, puis dans quelques pays d'Europe, à cause des particularités dues à la projection (cf. 1.1), l'idée de faire des essais sur des éprouvettes carottées ou sciées dans des échantillons projetés dans des caisses a été mise en pratique.

En France, vers 1960, le premier maître d'ouvrage à appliquer cette méthode d'essais a été E.D.F pour la construction des tunnels destinés à des aménagements hydroélectriques dans les Alpes.

EDF a été suivie par les chemins de fer, les métros, les sociétés d'autoroutes, et les maîtres d'ouvrages privés.

A l'occasion de ses chantiers "Rhône-Alpins", en plus des simples contrôles de résistance à la compression, EDF avait :

- fait faire les analyses granulométriques des mélanges projetés,
- étudié l'influence des accélérateurs de prise sur les résistances,
- créé une banque de données qui a servi ensuite à la rédaction (par l'AFTES) des premières recommandations sur l'exécution du béton projeté (recommandations publiées en 1972 dans le n°1 de la revue "Tunnels et Ouvrages Souterrains").

Depuis, le nombre des contrôles n'a cessé d'augmenter et leur qualité de s'améliorer.

Il reste toutefois des progrès à faire car, pour de nombreux chantiers, seule la résistance à la compression est contrôlée, ce qui est insuffisant.

Les mesures de perméabilité, de résistance à l'abrasion, de porosité se font rarement, alors qu'elles seraient souvent utiles.

Pour ce qui concerne la qualité de l'enrobage des armatures, il existe peu de moyens non destructifs de la contrôler, en dehors du contrôle du savoir-faire de l'opérateur réalisant la projection (appelé porte-lance dans les normes).

La formation des porte-lances est donc un des moyens d'agir sur la qualité de l'enrobage des armatures et il a été, de ce fait, indispensable de la développer et de sensibiliser les chefs de chantier et les cadres sur ce problème particulier

Une certification des « porte-lances », dans laquelle la qualité de l'enrobage est fortement prise en compte, a été mise au point par ASQUAPRO et, depuis 2003, des certificats sont délivrés à ces opérateurs de projection ayant réussi les épreuves pratiques et théoriques prescrites dans le référentiel.

En septembre 2013, 425 certificats avaient été délivrés ainsi que 220 autorisations de projeter sous la responsabilité d'un certifié pour des aspirants porte-lances.

1.3 PROBLEMES RENCONTRES

1.3.1 Pour les deux méthodes de projection

1.3.1.1 Différence de composition avant et après projection

Cette différence provient du fait que la mise en œuvre par projection agit toujours sur la compacité du béton in situ. Il est donc indispensable que le béton de l'échantillon destiné à un essai de contrôle ait été réalisé par projection (la seule exception est celle des essais sur béton frais servant à contrôler la consistance d'un béton destiné à être projeté par voie mouillée).

Les éprouvettes pour les essais sur béton durci doivent donc être prélevées, soit par carottage dans la structure, soit par sciage ou carottage dans des dalles réalisées par projection.

1.3.1.2 Couche de faible épaisseur ou ferrillée

Les épaisseurs des couches projetées étant généralement faibles, celles-ci sont très rarement suffisantes pour permettre d'y prélever des carottes d'élançement 2, telles qu'elles sont utilisées habituellement en France pour mesurer la résistance du béton durci.

Lorsque l'épaisseur de la couche de béton projeté dépasse 15 cm et qu'elle est peu ferrillée, il est évidemment possible d'y prélever des carottes de \varnothing 6 cm et de 12 cm de longueur, après avoir repéré les emplacements des aciers pour éviter de les couper.

Dans les autres cas, la solution universellement adoptée – qui résout les deux problèmes énoncés – consiste à confectionner les échantillons par projection dans des caisses ou des bacs de manière à réaliser des dalles de dimensions suffisantes pour pouvoir y prélever des carottes.

En France, la dalle en béton projeté qui est décrite dans la norme NF P 95-102 doit avoir 15 cm d'épaisseur dans la partie centrale où sont réalisés les carottages.

Les dimensions prescrites par la norme NF EN 14487-1 de 2006 étant compatibles avec celles de la « caisse AFNOR » de la NF P 95-102, ce type de caisse, bien connu des entreprises, peut donc continuer à être utilisé.

1.3.1.3 Enrobage des armatures

La projection générant un "effet d'ombre" susceptible d'entraîner la création de vides derrière les barres d'acier, le contrôle du bon enrobage des armatures est nécessaire.

Pour vérifier l'absence de vide derrière les aciers, la solution qui consisterait à faire des carottages traversant béton et nappes d'armatures ne peut évidemment être envisagée comme moyen de contrôle d'un ouvrage destiné à être mécaniquement sollicité.

Cette solution peut toutefois être employée sur des "planches d'essais" ou des ouvrages expérimentaux. En dehors de ces cas et tant qu'il n'existe pas un essai non destructif fiable, le seul moyen actuellement disponible pour contrôler l'enrobage est de vérifier, avant les travaux, la qualification des porte-lances par des tests pratiques et, pendant les travaux, de faire un suivi visuel de la projection.

1.3.2 Particularités dues à la voie sèche

Le béton *in situ*, projeté par voie sèche, a une composition différente de celle du mélange introduit dans la machine.

Cette particularité est générée par le fait que les pertes provoquées par la projection affectent nettement plus les gros éléments (gravillons et gros grains du sable), que le ciment et les autres produits fins (filler, fines du sable, fumée de silice, cendres volantes), ainsi que les adjuvants en poudre.

Il en résulte que, pour le béton en place, la teneur en ciment est considérablement plus élevée que celle du mélange de base, ce qui augmente évidemment sa résistance à la compression.

L'enrichissement en ciment peut varier de 20% à parfois plus de 100%, selon :

- l'épaisseur de la couche,
- la nature du support
- la formulation du mélange de base,
- la nature des granulats,
- l'emploi d'additions et d'adjuvants,
- le mouillage,
- la distance de projection,
- la vitesse dans le jet,
- le maniement de la lance par l'opérateur.

Une analyse du béton frais venant d'être projeté, permet de mesurer cet enrichissement. Elle ne peut évidemment être faite que sur un prélèvement réalisé *in situ* immédiatement après la projection (opération très difficile lorsqu'un accélérateur de prise est utilisé).

Cette analyse du béton en place impose de mesurer simultanément, d'une part la teneur en eau et d'autre part la teneur en ciment+ fines sur le prélèvement *in situ*.

Ces mesures sont faites en France depuis une vingtaine d'années, notamment sur les grands chantiers de réparation, malheureusement elles sont difficiles à réaliser.

Pour cette raison, les experts de la norme européenne ont décidé de ne pas les normaliser en tant que méthodes d'essais et par conséquent la norme ne formule aucune exigence relative au rapport eau/ciment dans le béton en place.

Une autre particularité due à la projection par voie sèche concerne la mesure de la consistance du béton venant d'être projeté.

En effet, les méthodes d'essais employées pour les bétons coulés (cône d'Abrams, essai Vébé, étalement,...) sont évidemment inappropriées.

Pour évaluer la consistance du béton en place sans le remanier par un prélèvement, un pénétromètre de poche permet d'obtenir un "indice de consistance". Cet essai, pourtant très simple, n'a pas été normalisé, pas plus en France qu'en Europe.

1.3.3 Problèmes propres à la projection par voie mouillée à flux dense

1.3.3.1 Pour le béton frais

Avec la projection par voie mouillée à flux dense, l'enrichissement de la teneur en ciment évoqué à propos de la voie sèche, peut être considéré comme négligeable.

La teneur en eau du béton in situ est également très proche de celle du béton venant d'être gâché.

Compte tenu des ces faibles différences, la consistance du béton projeté frais peut être évaluée (par l'essai normalisé d'affaissement par exemple), soit sur un prélèvement fait à la livraison sur chantier, soit sur un échantillon réalisé par projection...

Dans le cas d'un prélèvement après projection, l'essai n'est pas réalisé sur un béton ayant la consistance réelle du béton en place du fait de la différence de compactage entre l'échantillon projeté et celui tassé manuellement dans le cône d'Abrams.

Pour cette raison et parce que son utilité est très limitée, il n'est pas préconisé.

En revanche, les essais avant projection sont très utiles car ils permettent de contrôler que le mélange de base livré est bien dans la classe de consistance qui a été exigée, ce sont donc eux qui sont généralement prescrits.

1.3.3.2 Pour le béton durci

La norme française NF P 95-102 d'avril 2002 prescrit que l'inclinaison de la caisse destinée à la confection par projection des dalles de contrôle ne doit pas être supérieure à 20° par rapport à la verticale.

Cette prescription peut être facilement respectée en voie sèche, même avec un béton non accéléré mais, en voie mouillée, l'inclinaison maximale autorisée ne peut être respectée que lorsqu'un accélérateur de prise est ajouté à la lance, ce qui est généralement le cas des bétons projetés en tunnel ou sur des parois verticales de fouilles.

Dans les autres cas, par exemple pour la projection sur berge peu inclinée ou pour les bétons de sable "très collants" et projetés généralement sur seulement 4 à 6 cm d'épaisseur, les accélérateurs de prise ne sont pratiquement jamais utilisés.

Le remplissage par projection d'un béton très fluide d'une caisse de contrôle de 15 cm d'épaisseur posée avec une inclinaison maximale de 20° devient alors impossible.

Pour ces bétons projetés par voie mouillée et non accélérés, la projection dans une caisse posée horizontalement ne peut être évitée.

1.3.4 Problèmes propres à la projection par voie mouillée à flux dilué

Du fait du transport à grande vitesse dans un flux d'air et des pertes qui en découlent, un enrichissement de la teneur en ciment se produit comme en voie sèche mais il est nettement moins important.

Le transport par flux dilué a une autre conséquence : pendant le trajet machine – lance il assèche le mélange. La diminution de la teneur en eau qui en résulte peut aller jusqu'à réduire par exemple l'affaissement au cône de 50%.

Toute mesure de la consistance in situ devrait donc, si elle était prescrite, être faite sur un échantillon projeté, malgré la différence de compactage signalée en 1.3.3.1 à propos de la projection en flux dense.

L'utilité de cet essai est encore moindre qu'en flux dense car la diminution de la teneur en eau et l'augmentation de la teneur en ciment ont des effets bénéfiques sur la résistance du béton en place.

Seuls les essais sur béton frais avant projection sont nécessaires au titre du contrôle des travaux car ils permettent de vérifier la conformité du béton livré à la classe de consistance prescrite.

1.3.5 Problèmes propres aux bétons renforcés par des fibres

1.3.5.1 Teneur en fibres après projection

La modification de la teneur en fibres par la projection pouvant aller dans les cas extrêmes jusqu'à l'absence de fibres dans le béton en place, il est indispensable de mesurer cette teneur dans le béton fraîchement projeté sans attendre que des résultats d'essais sur béton durci fassent découvrir que les performances ne sont pas conformes aux exigences malgré un dosage de fibres convenable dans le mélange de base. Cela est plus ou moins facile suivant le type de fibres utilisées.

1.3.5.2 Essais sur béton durci

La teneur en fibres in situ pouvant être, comme on vient de le voir, très différente de celle du mélange de base, les essais sur les bétons projetés fibrés durcis, lorsqu'ils sont prescrits, doivent se faire sur des éprouvettes prélevées ou confectionnées par projection.

Pour les essais concernant les résistances à la compression ou à la traction des bétons sans fibre, les carottages sont pratiquement toujours réalisés dans la même direction que la projection (dans des échantillons projetés dans des caisses ou in situ).

Dans le cas particulier des bétons projetés renforcés par des fibres, des carottages réalisés dans une direction perpendiculaire à celle de la projection sont parfois prescrits pour étudier l'influence de l'orientation des fibres.

Pour l'essai de flexion centrée sur dalle, appelé maintenant essai d'absorption d'énergie, les échantillons sont projetés dans des caisses carrées de 60 x 60 x 10 cm et, pour les essais de flexion sur prismes, les éprouvettes sont découpées par sciage dans des plaques réalisées par projection.

2 DESCRIPTION DES ESSAIS

2.1 PRESENTATION

Le présent fascicule décrit succinctement les méthodes d'essais, normalisées ou non, spécifiques au béton projeté ou non, utilisables pour contrôler la qualité du béton projeté.

La mise en pratique de ces méthodes d'essais, pour ce qui concerne les opérations devant être réalisées sur les chantiers font l'objet de la partie B du fascicule "contrôles".

L'essai de la norme NF P 95-102 homologuée en avril 2002 va être d'abord examiné.

La première version de cette norme, homologuée en juin 1992 a été modifiée en 2002 de façon à ne pas contredire les normes européennes EN 14487 et EN 14488 en cours de validation à cette époque.

L'essai prescrit dans cette norme française pour mesurer la résistance à la compression d'un béton projeté étant plus exigeant que celui de l'EN 14487-1 (par exemple diamètre minimal des carottes de 60 mm au lieu de 50 mm pour l'EN), les prescriptions de la NF P 95-102 de 2002 peuvent continuer à être respectées en France.

2.2 ESSAI NF P 95-102 DE RESISTANCE A LA COMPRESSION

Pour cet essai la norme énonce les prescriptions relatives à la confection des échantillons. Elle définit les dimensions de la caisse et les conditions de prélèvement par carottage des échantillons destinés aux essais sur béton durci.

Comme indiqué ci-dessus en 2.1, cet essai peut continuer à être utilisé, nous donnons donc ci-dessous les prescriptions extraites du texte de la norme de 2002.

2.2.1 Extrait de la norme NF P 95-102

Prescriptions relatives à la confection des échantillons, énoncées dans le § 10.1.1.1 de la version de 2002.

"... il est procédé à la projection de béton, dans des caisses plates et dans des conditions à l'amont de la lance, rigoureusement identiques à celles des travaux : machine, constituants, méthodes.

On utilise des caisses comportant un fond en bois de surface supérieure ou égale à 0,25 m² et de largeur supérieure ou égale à 0,40 m, le petit côté de la caisse étant placé horizontalement. Le béton est projeté perpendiculairement au fond de la caisse placée verticalement ou avec une inclinaison inférieure à 20 ° sur la verticale. L'épaisseur du béton est de 15 cm dans la zone de carottage, de manière à pouvoir obtenir par carottage et sciage des éprouvettes de 12 cm de hauteur.

La distance de projection (d) est en principe égale à 1 m sauf si les conditions d'exécution imposent une distance inférieure.*

** : (d) est la distance cotée sur le dessin de la norme*

2.2.2 Commentaires sur l'essai

Les rédacteurs de la norme ont imaginé une caisse suffisamment petite pour être transportable manuellement mais suffisamment grande pour pouvoir y prélever par carottage au moins 6 éprouvettes de 6 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur de manière à obtenir après sciage et surfacage des cylindres d'élanement 2.

Des caisses en matière plastique, en polystyrène, en tôle ou autre matériau peuvent être utilisées mais, dans ce cas, une plaque de bois doit être mise en place sur le fond devant recevoir la projection.

Il faut d'abord souligner que la surface minimale préconisée (0,25 m²) est nettement insuffisante lorsque la projection est réalisée à l'aide d'un bras mécanique (appelé "robot"). Dans ce cas une surface au moins double est nécessaire.

La distance de projection de 1 mètre est donnée à titre indicatif.

Comme cela est signalé dans le texte, elle doit être diminuée lorsque, sur le chantier, le recul est insuffisant pour qu'elle puisse être possible (par exemple dans une galerie de 1 mètre de largeur).

Inversement, lorsque des machines à très gros débit sont employées et qu'une distance lance-paroi nettement supérieure à 1 mètre est utilisée, l'essai doit être réalisé avec une distance de projection du même ordre que celle utilisée pour les travaux.

Pour la **projection par voie sèche**, il est possible, tout en respectant les prescriptions concernant la caisse, de réduire le "piégeage" des pertes.

Comme il n'est en effet pas stipulé dans la norme que les côtés de la caisse doivent être pleins, il est possible de les ajourer, en utilisant par exemple, des guides d'épaisseur constitués de tasseaux ou de chevrons superposés à leurs extrémités.



Caisse à bords ajourés pour projection manuelle

Ce dispositif permet aux pertes de s'échapper latéralement au moment de la projection. Cette possibilité a été reprise dans la norme européenne NF EN 14488-1 (article 4.3).

Comme cela a été signalé (voir 1.3.3.2), dans le cas de la projection par voie mouillée des bétons non accélérés (par exemple pour les bétons de sable très souvent employés pour projeter des coques minces en égout) la projection vers le bas quasi-verticale est impossible sur 15 cm d'épaisseur. Il est donc autorisé de poser la caisse horizontalement. Il est alors indispensable d'utiliser une caisse à côtés fermés.

La zone de prélèvement des éprouvettes dans un échantillon projeté n'a pas été définie dans le texte mais elle est indiquée sur la figure 6 de la norme NF P 95 102. La zone de carottage est un cercle de 30 cm de diamètre situé au centre de la dalle (où l'épaisseur de béton doit être de 15 cm).



Caisnes prévues pour projection voie mouillée avec bras robot (tunnel de Bois de Peu)

2.3 ESSAIS NORMALISES SPECIFIQUES AU BETON PROJETE

2.3.1 NF EN 14488-1 : Echantillonnage de béton frais et de béton durci

Cet échantillonnage, qui est décrit dans la partie 1 de la norme EN 14488, concerne directement l'essai AFNOR cité en 2.2.1, pour lequel il a été remarqué que les dimensions prévues pour la caisse (0.25 m² avec petit côté \geq 0.40 m) respectaient les prescriptions de la nouvelle norme et pouvaient donc être conservées pour la projection manuelle.

Il existe néanmoins une petite différence entre la NF P 95 102 et la NF EN 14488-1.

La zone de carottage circulaire de 30 cm de diamètre devient un carré de côté égal au côté de la caisse moins 2 fois la hauteur des bords.

On voit qu'avec une caisse type Afnor de 600 x 600 x 150, il reste bien les 300mm de l'ancienne zone de carottage, ce qui est supérieur à l'exigence nouvelle d'un carré de plus de 250 mm de côté.

Il est demandé néanmoins de « prendre des mesures appropriées » pour éviter le piégeage des pertes par les bords de la caisse.

En utilisant des bords ajourés grâce à 3 lits alternés de tasseaux de 50 mm, ou 2 lits de chevrons comme cela se fait souvent actuellement, il est possible d'obtenir une plus grande zone de carottage et de pouvoir faire, par exemple, 9 carottes de Ø 60 mm au lieu de 6.

Pour ce qui concerne les dimensions des carottes, la norme 14488-1 ne donne aucune indication et il faut consulter la norme NF EN 14487-1 pour trouver les prescriptions qui sont moins exigeantes que les françaises (en principe Ø 60 mm avec élanement 2)

En effet le tableau 8 de l'article 5.5, l'EN 14487-1 précise que les carottes sont prélevées « à partir de dalles projetées conformément à l'EN 14488-1 » et que « Leur diamètre minimal doit être de 50 mm et le rapport hauteur/diamètre doit être égal à 1 ou 2 ».

La note suivante concerne le rapport longueur/diamètre :

- « 2.0 si la valeur de la résistance doit être comparée à la résistance d'un cylindre »
- « 1.0 si la valeur de la résistance doit être comparée à la résistance d'un cube »

Compte tenu du nombre d'essais réalisés en France depuis 1972 sur des carottes de Ø 60 mm et d'élanement 2 (conformément aux premières recommandations AFTES publiées à cette date), il paraît nettement préférable de conserver ces dimensions.

La norme NF EN 14488-1 reprend les prescriptions françaises de pose de la caisse à moins de 20 degrés du plan vertical mais ne tient pas compte de l'infaisabilité de cette exigence si un béton fluide non accéléré est projeté par voie mouillée. Le problème n'étant pas résolu pour autant, la remarque faite au paragraphe 1.3.3.2 du présent document reste valable. La dérogation (caisse à l'horizontale) doit être mentionnée sur le rapport d'essais.

2.3.2 NF EN 14488-2 : Essais de résistance à la compression au jeune âge

2.3.2.1 Pourquoi de tels essais ?

Pour pouvoir faire une estimation de la résistance d'un béton projeté, quelques heures seulement après sa mise en œuvre, l'essai décrit dans le paragraphe précédent ne peut être utilisé.

Il est en effet impossible de carotter dans un échantillon dont la résistance à la compression est inférieure à 10 MPa car le carottier déchausse les granulats qui se mettent à tourner dans la pâte insuffisamment durcie.

Lorsque le béton projeté est utilisé comme soutènement immédiat dans la construction des tunnels par exemple, les ingénieurs ont toujours cherché à connaître la résistance atteinte par le béton au très jeune âge.

En France la SNCF a réussi, dès 1990, à faire découper des cubes par sciage dans des dalles projetées depuis 3 heures et à mesurer la résistance à la compression de bétons spéciaux à résistance initiale garantie.

En Suisse, le « pull out test » a été utilisé dans le même but en mesurant la force nécessaire pour arracher un insert et en mesurant le cône d'arrachement.

En Autriche enfin, deux essais successifs, le premier par enfoncement d'une aiguille, le second par enfoncement et arrachement d'un clou fileté, ont été mis au point.

Le groupe de travail WG 10 du comité TC 104 de la CEN a utilisé les études et expérimentations autrichiennes pour mettre au point la norme 14488-2 intitulée "Résistance à la compression au jeune âge du béton projeté".

2.3.2.2 Principe des essais sur le béton jeune

2.3.2.2.1 Pénétration d'une aiguille (essai A)

L'essai A utilise la mesure de la force nécessaire pour faire pénétrer une aiguille dans le béton jeune dont la résistance est supposée comprise entre 0,2 et 1,2 MPa.

La mesure est faite à l'aide d'un pénétromètre comportant une aiguille de 3 mm de diamètre, à pointe conique dont l'angle est de 60°. L'extrémité de cette aiguille doit être enfoncée jusqu'à une profondeur de 15 mm dans le béton projeté.

La valeur de la force de réaction permet de donner une estimation de la résistance à la compression à partir d'une courbe de conversion.

La méthode permet d'évaluer cette résistance dans une plage allant de 0,2 à 1,2 MPa. Il est prévu de répéter l'essai 10 fois le plus rapidement possible (et en moins d'une minute pour les résistances inférieures à 0,5 MPa).

2.3.2.2.2 Enfoncement et arrachement d'un clou fileté (essai B)

L'essai B utilise la mesure de la force nécessaire pour arracher un clou préalablement enfoncé dans un béton dont la résistance est plus élevée que celle justiciable de l'essai A de pénétration d'aiguille, qui a généralement été pratiqué sur ce même béton projeté lorsqu'il était plus jeune.

Le test B est considéré comme applicable lorsque la résistance est supposée comprise entre 3 et 16 MPa.

Les clous sont enfoncés par percussion à l'aide d'un pistolet de scellement en utilisant un équipement approprié pour le faire pénétrer d'au moins 20 mm.

Le moment opportun pour l'enfoncement des clous doit être déterminé en fonction du durcissement du matériau.

Les clous doivent avoir un diamètre de 3,7 mm, des extrémités filetées permettant de les relier au dispositif d'extraction et des longueurs suffisantes pour obtenir la pénétration exigée > 20 mm (la pointe des clous de scellement est de forme ogivale).

Si le clou le plus long pénètre complètement, il est prescrit d'attendre et de recommencer l'essai lorsque le béton est plus dur.

Si la partie saillante du clou est trop longue (pénétration < 20 mm) un clou plus court doit être utilisé.

L'essai doit être répété, en maintenant une distance > 80 mm entre les clous, jusqu'à ce que 10 clous soient insérés. La longueur en saillie de chaque clou est mesurée pour en déduire la profondeur de pénétration "L".

L'équipement d'extraction, qui transmet la réaction au béton par l'intermédiaire d'une couronne d'appui, doit être muni d'un système indiquant et enregistrant la force maximale exercée avec une précision de 5%.

La force moyenne d'extraction "P" (sur 10 mesures) est calculée à l'aide de la courbe d'étalonnage fournie avec l'équipement.

La résistance à la compression peut être estimée sur la base du rapport P/L, à l'aide de la courbe de conversion du fabricant. Aucune extrapolation n'est permise.

La norme EN 14488-2 donne, pour les deux méthodes qu'elle préconise (pénétration d'aiguille de 0,2 à 1,2 MPa et arrachement de clou de 3 à 16 MPa), des directives concernant les rapports d'essais.

Pour ces deux méthodes il n'existe actuellement aucune donnée relative à la fidélité.

2.3.3 NF EN 14488-3 : béton projeté fibré ; essai en flexion sur Prisme

Le titre complet de la norme est le suivant :

Essais pour béton projeté : résistance à la flexion (au premier pic, ultime et résiduelle) d'éprouvettes parallélépipédiques de béton fibré.

2.3.3.1 Pourquoi un tel essai ?

Depuis que des fibres ont été incorporées au béton projeté, les fabricants et les maîtres d'œuvre ont cherché à mettre au point des essais permettant non seulement de mettre en évidence le rôle des fibres et leur intérêt mais également de contrôler, sur les chantiers, les performances mécaniques des bétons projetés fibrés ayant été mis en œuvre.

Il a été très vite montré que la fissuration due au retrait du béton était aussi bien sinon mieux répartie avec des fibres qu'avec du treillis soudé mais, pour le comportement mécanique du béton fibré, il n'est pas envisageable d'appliquer les règles de calcul du béton armé, les fibres n'étant pas assimilables à des armatures continues.

Les ingénieurs ont donc imaginé d'étudier le comportement d'éprouvettes de structures composites en béton fibré au lieu de dissocier, comme pour le calcul du béton armé, le rôle du béton de celui de l'acier.

Les premiers essais, vers 1970, ont été des mesures de résistances à la compression sur des cubes ou des cylindres et on s'est vite aperçu que cette résistance était peu influencée par les fibres et même qu'elle diminuait lorsque la teneur en fibres était élevée.

Les premiers essais de comportement d'une éprouvette prismatique soumise à un essai de flexion ont d'abord été mis au point aux USA (essai ASTM C1018-89).

Pour cet essai, la flèche est mesurée et la courbe charge/flèche est tracée. Cette courbe présente un pic correspondant à la première rupture mais ensuite la courbe, au lieu de s'effondrer immédiatement comme pour un prisme non armé, peut présenter d'autres pics et descendre ensuite plus ou moins rapidement selon la qualité des fibres et leur dosage.

L'essai ASTM a été très longtemps utilisé dans le monde entier. Une variante exploitant d'une manière légèrement différente la courbe charge/flèche a ensuite été mise au point au Japon.

En France un essai en "flexion 4 points" sur éprouvette de 140 x 140 x 500 à vitesse de déplacement constante, a été mis au point pour les bétons coulés fibrés mais il pouvait être utilisé pour le béton projeté à condition de scier les prismes dans une dalle projetée.

Cet essai AFNOR XP-P 18409 est maintenant supprimé.

En Suède enfin, un essai a été mis au point, spécialement destiné au béton projeté fibré.

Cet essai est proche de l'essai français, aux dimensions de l'éprouvette près, mais il comporte une évaluation de la ductilité par examen de trois résistances résiduelles successives.

Le groupe de travail WG 10 du comité TC 104 de la CEN a utilisé les études et expérimentations suédoises pour mettre au point la norme NF EN 14488-3.

2.3.3.2 Principe de l'essai

L'éprouvette de 75 mm de hauteur, de 125 mm de largeur et d'au moins 500 mm de longueur est sciée dans un échantillon de béton projeté fibré de dimensions suffisantes pour y découper 3 éprouvettes (une dalle de 500 mm x 700 mm environ peut convenir).

Chaque éprouvette est soumise à l'essai, la face inférieure (coffrée) étant celle à mettre en tension.

Le principe du dispositif de chargement est celui de l'essai anciennement appelé « flexion 4 points », appelé maintenant « résistance à la flexion avec mise en charge en deux points » décrit dans la norme NF EN 12390-5 de 1999.

Les 2 points de chargement sont constitués par deux rouleaux en acier, de 20 à 40 mm de diamètre, écartés de 150 mm, placés sur la partie supérieure de l'éprouvette.

Les deux rouleaux supports, en acier et de même diamètre, sont écartés de 450 mm.

La montée en charge de l'éprouvette doit être faite à vitesse de variation de flèche constante, la flèche étant mesurée en continu à mi-portée.

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

Pour plus de détails sur la presse, la fixation des appareils de mesure, les tolérances des éprouvettes et leur conservation, ainsi que sur l'expression des résultats et le rapport d'essai, il est indispensable de consulter la norme NF EN 14488-3.

2.3.4 NF EN14488-4 : Essais pour béton projeté : adhérence en traction directe

2.3.4.1 Pourquoi un tel essai ?

Depuis que du béton est projeté sur un support autre qu'un coffrage, la connaissance de la valeur de l'adhérence béton-support a été recherchée.

Cette connaissance est souvent jugée plus importante que celle de la résistance intrinsèque du béton projeté, notamment pour les travaux de renforcement et de réparation du béton armé. Pour ces travaux, l'adhérence, entre la structure existante et son renforcement est primordiale pour que l'ensemble fonctionne de manière monolithique (voir chapitre 3 du fascicule « Dimensionnement »).

L'essai in situ, utilisant un appareil de traction tripode surmonté d'un vérin à soufflet, décrit dans la norme NF P 18-858 pour tester des produits de réparation appliqués en faible épaisseur sur un béton de référence coulé, a d'abord été employé.

Il s'est très vite avéré que cet essai ne convenait pas pour mesurer l'adhérence sur une surface irrégulière.

A titre d'exemple, 10 carottes réalisées dans un plaque de béton recouverte de béton projeté et testées in situ en traction avec l'appareil tripode, ont donné des résultats variant de 0,2 à 0,8 MPa alors que sur 5 carottes prélevées dans la même planche d'essai (de 1,20 m sur 0,30 m) entre les carottes précédentes, les adhérences mesurées en laboratoire ont été comprises entre 3,4 et 3,6 MPa en utilisant l'essai en traction directe.

Ce phénomène était bien connu lors de la rédaction de la norme NF P 95-102 puisqu'on y relève les remarques et recommandations suivantes :

Deux types d'essais permettent de déterminer l'adhérence sur le support :

- *un essai in situ, consistant en l'arrachement par traction de carottes prédécoupées dans le revêtement et le support à tester,*
- *un essai de traction directe, en laboratoire, sur carottes prélevées dans le revêtement et le support à tester.*

Ce second type d'essai est préférable au précédent.

Deux précautions sont à prendre :

- *le carottage ne doit pas altérer l'éprouvette; ceci suppose un carottier en bon état de fonctionnement, bien fixé sur la paroi et un outil de coupe adapté (dans l'état actuel des connaissances, l'appréciation du matériel de carottage est seulement qualitative) ;*
- *l'axe de traction du vérin (essai in situ) ou de la machine de traction (essai de laboratoire) doit coïncider avec l'axe longitudinal de l'éprouvette ce qui suppose un appareillage d'essai bien adapté, en bon état et un personnel très qualifié.*

Dans cette norme l'essai en laboratoire était recommandé mais l'essai in situ n'était pas interdit.

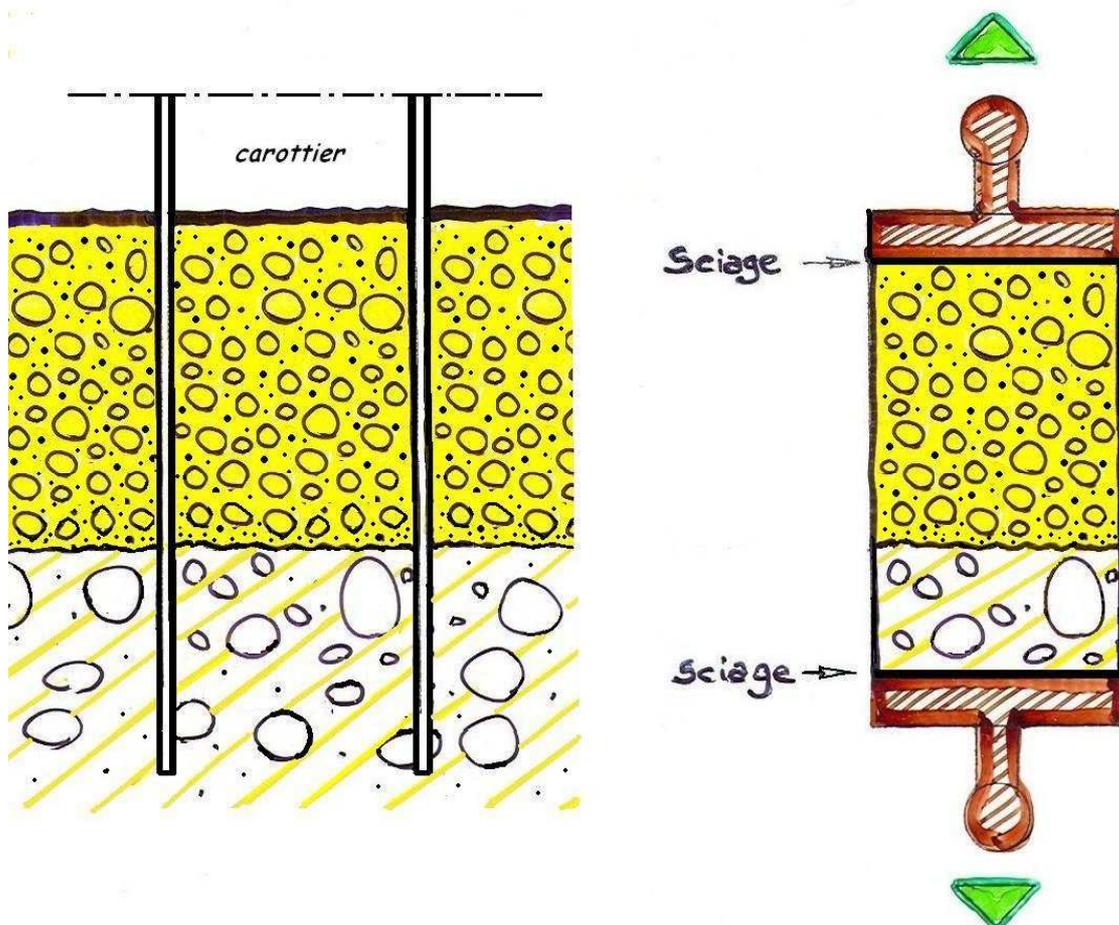
La norme NF EN 14488-4 que nous examinons ne concerne elle que le seul essai de traction directe réalisé en laboratoire sur des carottes prélevées dans l'ouvrage. L'essai in situ, non cité dans cette norme car inadapté au béton projeté, est fortement déconseillé.

2.3.4.2 Principe de l'essai

Une carotte de 50 à 100 mm de diamètre (d) et de longueur $\geq 2d$ est prélevée dans la couche de béton projeté et le support. La carotte est coupée transversalement de façon que sa longueur = $2d$ et la zone d'adhérence se situe aussi près que possible du milieu de l'éprouvette.

Des pastilles en acier de diamètre égal à celui de la carotte (± 1 mm) sont collées sur les 2 extrémités rectifiées et l'éprouvette est soumise à une traction croissante jusqu'à la rupture.

Pour avoir des détails sur la machine d'essai de traction, les pastilles en acier et leur collage, les tolérances des éprouvettes et leur conservation, ainsi que sur l'expression des résultats et le rapport d'essai, il est indispensable de consulter la norme NF EN 14488-4.



Croquis montrant, à gauche le carottage et à droite, l'essai de traction directe
(croquis ASQUAPRO)

2.3.5 NF EN 14488-5 : Capacité d'absorption d'énergie d'une dalle fibrée

Le titre exact de la norme est le suivant :

Essais pour béton projeté : Détermination de la capacité d'absorption d'énergie d'une dalle-éprouvette renforcée par des fibres

2.3.5.1 Pourquoi un tel essai ?

L'utilité d'un essai permettant d'étudier le comportement post-fissuration du béton fibré a été évoquée dans le paragraphe 2.3.3.1 à propos des essais réalisés sur des éprouvettes prismatiques soumises à des moments de flexion.

En Suède, l'essai, dérivé de l'essai ASTM mais spécialement destiné au béton projeté fibré, a été expérimenté et a donné naissance à la norme NF EN 14488-3 qui permet d'évaluer la ductilité en calculant la résistance au premier pic, à des résistances résiduelles successives et à la résistance ultime.

Pendant ce temps, en France, la SNCF, les fabricants de fibres et un laboratoire de Grenoble, mettaient au point un essai très différent pour lequel une dalle carrée, en béton fibré a été projetée pour être soumise à un essai en flexion centrée.

Cet essai, parfois appelé « essai de poinçonnement » permet, comme les essais sur éprouvettes prismatiques, de tracer la courbe charge/flèche. Il permet également d'évaluer le comportement du béton fibré, en calculant l'énergie dépensée au fur et à mesure du chargement.

Le groupe de travail CEN / TC 104 / WG 10 a considéré que les 2 essais donnaient des informations différentes mais qu'ils convenaient, tous les deux, pour contrôler la qualité et pour définir les classes des bétons projetés fibrés (voir les tableaux 2 et 3 de la NF EN 14487-1).

La méthode d'essai française a donc été utilisée pour rédiger la norme NF EN 14488-5. Une variante avec des plaques circulaires n'a pas été retenue.

Principe de l'essai

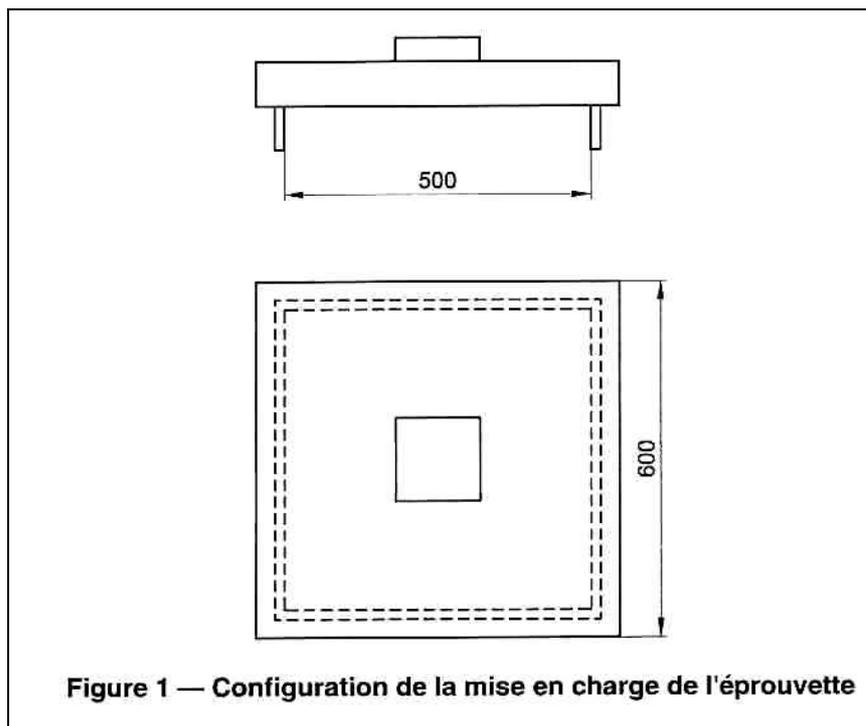
Une dalle de 600 x 600 x 100 mm, renforcée par des fibres et projetée conformément à la NF EN 14488-1, est soumise à une charge par l'intermédiaire d'un bloc carré en acier rigide placé au centre de la dalle et la flèche est mesurée.

La courbe charge/flèche est mesurée et l'essai est poursuivi jusqu'à l'obtention d'une flèche d'au moins 30 mm au centre de la dalle.

A partir de cette courbe, une seconde courbe est tracée, indiquant l'énergie absorbée en fonction de la flèche. C'est l'énergie absorbée pour la flèche de 25 mm qui est prise en compte pour caractériser le béton projeté fibré.

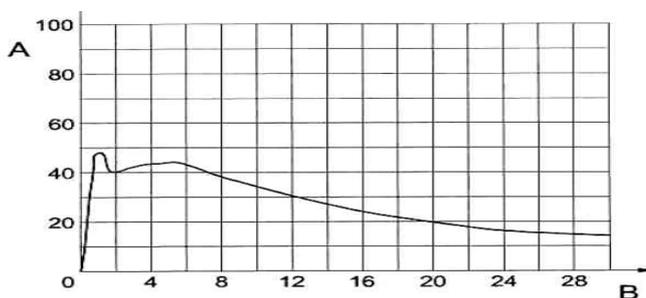
Pour tout ce qui concerne la machine d'essai et son pilotage, la confection de l'éprouvette, sa mise en charge, l'expression des résultats et le rapport d'essai, **il convient de se reporter au texte de la norme NF EN 14488-5.**

Figure 1 de la norme



Le poinçon carré qui n'est pas coté sur cette figure a 100 mm de côté

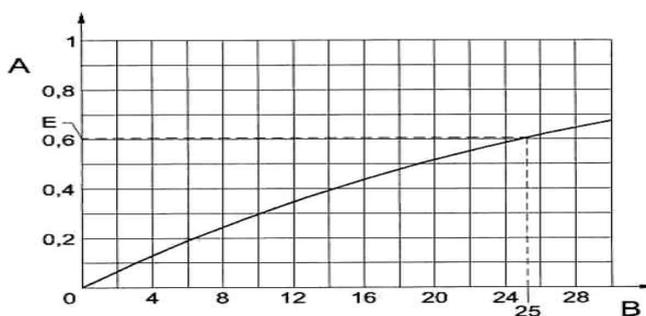
Figure 2 et 3 de la norme



Légende

- A Charge, en kN
- B Flèche, en mm

Figure 2 — Exemple de courbe charge/flèche



Légende

- A Énergie, en joules (10⁴)
- B Flèche, en mm
- E Capacité d'absorption de l'énergie

Figure 3 — Exemple de courbe énergie/flèche

Il faut noter que dans la figure 3 de la norme, les énergies ont été notées par erreur en kilojoules et non en joules.

2.3.6 NF EN 14488-6 mesure de l'épaisseur du béton sur un support

Le titre exact de la norme est le suivant : **Essais pour béton projeté : épaisseur du béton sur un support**

2.3.6.1 Commentaire

Cet essai est certainement le moins utile de la série. Son seul mérite est de donner une procédure de référence pour réaliser la mesure de l'épaisseur projetée.

On y apprend que dans le béton frais « une jauge de profondeur est enfoncée dans le béton projeté afin d'en mesurer l'épaisseur » et que, pour le béton durci, « les trous peuvent être percés ou les carottes prélevées jusqu'au support. La profondeur des trous ou la longueur des carottes extraites sont ensuite mesurées ».

Il est ensuite prescrit de percer 5 trous espacés de 600 ± 50 mm sur 2 lignes perpendiculaires ou de réaliser des carottes suivant le même schéma.

Si le besoin se fait sentir d'obtenir plus de détails pour ce qui concerne les mesurages, l'expression des résultats et le rapport d'essai, il convient de se reporter au texte de la norme.

2.3.7 NF EN 14488-7 teneur en fibres du béton projeté fibré

Le titre exact de la norme est le suivant :

Essais pour béton projeté : teneur en fibres du béton renforcé par des fibres

2.3.7.1 Pourquoi un tel essai ?

On a vu en 1.3.5.1, que la teneur en fibres du béton en place pouvait être très différente du dosage préconisé pour le mélange de base et que, de ce fait, il était nécessaire de connaître cette teneur dès la projection pour éviter des déconvenues lors de la réception des résultats des essais sur béton durci (NF EN 14488-3 et 14488-5).

Pour cette raison l'essai sur béton frais est le plus important car c'est bien la teneur in situ qui détermine les performances mécaniques du béton durci que l'on ne connaît parfois qu'après la fin des travaux.

La mesure de la teneur en fibres du béton durci est néanmoins utile lorsque des essais sur béton frais n'ont pu être réalisés ou que l'on veut connaître la corrélation entre la teneur en fibre in situ et les performances mécaniques du béton projeté durci.

2.3.7.2 Principe de l'essai

« Les fibres sont extraites d'un échantillon de béton durci (méthode A) ou de béton frais (méthode B) et l'on détermine la teneur en fibres à partir de leur masse et du volume de l'échantillon de béton » (article 3 de la norme).

On voit, que pour la méthode A comme pour la méthode B, il faut peser les fibres extraites et mesurer le volume de l'échantillon.

Méthode A (sur béton durci)

Trois carottes de diamètre compris entre 50 et 100 mm sont prélevées dans le matériau in situ ou dans un panneau d'essai.

Leur volume est déterminé par calcul d'après leurs dimensions mesurées ou par pesées dans l'eau conformément à l'EN 12350-6.

Chaque carotte est écrasée jusqu'à désagrégation complète pour séparer les fibres du béton.

Les fibres magnétiques sont ensuite récupérées à l'aide d'un aimant, séchées, nettoyées et pesées à 0,1 g près.

Méthode B (sur béton frais)

Trois échantillons pesant entre 1 et 2 kg (*) sont découpés à la truelle, in situ ou dans un panneau d'essai.

Leur volume est déterminé par pesée dans l'air puis dans l'eau (EN 12390-7), la masse volumique de l'échantillon humide est ensuite calculée.

Les fibres sont retirées de l'échantillon par lavage sur un tamis ne laissant pas passer les fibres. Pour les fibres synthétiques, l'échantillon peut être imbibé d'eau (fibres polypropylène) ou d'alcool (pour certaines autres fibres) et agité jusqu'à ce que les fibres flottent à la surface.

Elles doivent être ensuite séchées, nettoyées et pesées à 0,1 g près pour les fibres en acier ou à 0,01 g près pour les fibres polymères.

Pour avoir plus de détails sur le prélèvement des échantillons, l'expression des résultats et le rapport d'essai, il est indispensable de consulter la norme.

(*) En réalité la norme devrait être révisée car les échantillons prélevés ont généralement un volume d'un litre et pèsent donc entre 2 et 3 kg.

2.4 ESSAIS NORMALISES NON SPECIFIQUES AU BETON PROJETE

Des essais, qui existent depuis de nombreuses années pour mesurer et contrôler certaines caractéristiques des bétons mis en place par coulage, peuvent être utilisés pour les bétons projetés, sans adaptation.

C'est le cas par exemple de la mesure d'affaissement (NF EN 12350-2) permettant d'évaluer la consistance d'un béton frais (appelée également essai au cône d'Abrams) qui est utilisée pour le béton projeté par voie mouillée.

Pour les essais qui n'étaient pas destinés à l'origine aux bétons projetés mais qui peuvent y être appliqués, il est nécessaire de séparer :

- les essais sur béton frais de ceux sur béton durci.
- pour les essais sur béton frais, ceux réalisés avant ou après projection.
- la projection par voie sèche de celle par voie mouillée.

Ces essais sont très nombreux mais ils sont loin d'être tous utilisés en France, seuls ceux pratiqués couramment sur les chantiers et dont les prescriptions se réfèrent aux normes et aux règlements français, sont donc développés dans ce fascicule.

C'est le cas pour l'essai d'affaissement (cité ci-dessus) et celui d'étalement sous cône d'Abrams (NF EN 12350-8).

Les autres essais, normalisés NF mais peu utilisés pour le béton projeté, comme par exemple celui provenant de la norme EN 12350-3 (essai Vébé), ne sont pas cités dans la liste des normes éventuellement utilisables.

2.4.1 Essais sur béton frais

2.4.1.1 Essais avant projection

2.4.1.1.1 *Cas de la voie sèche*

Le béton projeté par voie sèche ne se mélange intimement à son eau de mouillage qu'au moment de l'impact du jet sur le support. Il ne peut donc pas exister, pour cette méthode, d'essais sur béton frais avant projection.

Seules des mesures sur des mélanges secs (fabriqués en usine et livrés en sacs ou silos) ou sur des mélanges légèrement humides (fabriqués sur chantier ou en centrale avec du sable non séché) peuvent donc se faire mais il ne s'agit évidemment pas de "béton frais".

Des essais peuvent néanmoins être pratiqués, avant projection, sur ces mélanges "secs", par exemple leur analyse granulométrique, (après séchage si le mélange contient du sable non séché), afin de contrôler leur conformité aux prescriptions.

2.4.1.1.2 Cas de la voie mouillée à flux dense

Avec cette méthode, l'eau introduite au moment du gâchage ne peut s'échapper pendant le passage du béton dans la pompe ou dans le tuyau de transport. Elle se retrouve donc en quasi-totalité dans le béton en place.

Mesure de la teneur en eau

La seule perte d'eau due à une éventuelle vaporisation entre la lance et la paroi réceptrice pouvant être considérée comme négligeable, une mesure de la teneur en eau du béton pourrait être pratiquée, (aussi bien avant qu'après la projection) mais il n'existe pas actuellement de méthode normalisée pour effectuer cette mesure.

Mesure de la masse volumique

Avant la projection, cette mesure peut être réalisée en respectant intégralement les prescriptions de l'essai normalisé NF EN 12350-6 sur un échantillon d'au moins 5 dm³ prélevé avant le pompage et compacté, selon la norme, par vibration ou manuellement.

En se référant à l'avant-propos de cette norme qui précise "un volume plus petit peut convenir pour les essais de contrôle de production" et en tenant compte du fait que les bétons projetés ont des granularités plus faibles que celles des bétons coulés, un volume minimal de 2 dm³ peut être préconisé.

Pourtant, même avec ce volume réduit de 2 dm³, cet essai de laboratoire, quasi inutile il est vrai au plan du contrôle, n'est jamais prescrit pour évaluer, sur chantier la qualité d'un béton projeté.

Mesure de l'affaissement.

L'essai normalisé pour béton frais le plus employé sur les chantiers français est celui de la norme NF EN 12350-2 concernant la mesure de l'affaissement au « cône d'Abrams ».

Cet essai permet en effet, non seulement de vérifier que la classe de consistance d'un béton, prêt à être projeté, est conforme à la classe de consistance prescrite mais également de recueillir des informations utiles sur son aptitude au pompage.

La facilité d'exécution de l'essai et les valeurs de fidélité de ses résultats ont largement contribué à son développement et à sa pérennité.

Il se pratique sur un prélèvement fait à l'endroit de la livraison du béton (sortie de bétonnière, de dumper, de benne ou de toupie de BPE).

Le béton prélevé est ensuite introduit dans le cône, compacté par piquage, démoulé en respectant les prescriptions de la norme (nombre de couches, mode de piquage, temps de démoulage,...) et l'affaissement mesuré.

Si cet affaissement est supérieur à 20 cm, il est recommandé de faire l'essai d'étalement décrit dans le paragraphe qui suit.

Pour les détails sur les mesures du cône ainsi que sur la procédure d'essai et son exploitation, **il convient de se reporter à la norme NF EN 12350-2.**

Mesure de l'étalement au cône d'Abrams

L'essai d'étalement au cône d'Abrams convient pour les bétons courants ayant des affaissements supérieurs à 20 cm.

Pour le réaliser le cône d'Abrams décrit dans la **norme NF EN 12350-2 doit être utilisé.**

Seule la plaque réceptrice placée horizontalement pour recevoir le béton est différente. Elle doit être carrée avec des côtés ≥ 900 mm. Deux cercles concentriques dont le centre est situé au centre du carré doivent être tracés : un de $\varnothing 210 \pm 1$ mm et l'autre de $\varnothing 500 \pm 1$ mm.

Pour les détails sur le mode opératoire de l'essai et son exploitation, **il convient de se reporter à la norme NF EN 12350-8.**

Utilisation du maniabilimètre LCPC

Ce type d'appareil, parfois appelé "maniabilimètre Lesage" du nom de l'ingénieur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées qui l'a mis au point, mesure le temps d'écoulement d'une quantité déterminée de béton (ou de mortier) sortant d'un récipient mis en vibration.

L'essai a été normalisé en mai 1988 (NF P 18-452) en tant que « mesure de l'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres »

Cet appareil est surtout utilisé en laboratoire pour formuler, selon la méthode « Baron – Lesage », des bétons à projeter par voie mouillée en flux dense.

Il n'est jamais utilisé pour contrôler la conformité aux prescriptions d'un béton livré sur chantier. Les mesures d'affaissement ou d'étalement, plus simples, étant suffisantes pour cela.

Mesure de la teneur en air occlus

Cette mesure peut être préconisée lorsque, par exemple, une certaine teneur en air occlus est prescrite dans le but d'augmenter la résistance aux gels-dégels d'un béton.

La conformité d'un béton à cette prescription peut dans ce cas être contrôlée en utilisant l'essai de la norme NF EN 12350-7 à laquelle il faut donc se reporter.

Toutefois l'attention du lecteur est attirée sur la modification de la teneur en air occlus due au processus de la projection (par voie sèche ou par voie mouillée) puisqu'une quantité importante d'air comprimé est introduite, soit dans la machine (VS) soit dans la lance (VM). Pour tous les bétons projetés, la fiabilité de l'essai est donc douteuse.

2.4.1.1.3 Cas de la voie mouillée à flux dilué :

Avec cette méthode, la mesure d'affaissement, et celle de l'étalement permettent de contrôler la conformité aux prescriptions du béton livré mais elle ne peut donner d'indication sur les caractéristiques du béton après projection car, en flux dilué, le béton après son trajet à grande vitesse dans un flux d'air, peut avoir perdu une part importante de son eau par assèchement.

2.4.1.2 Essais sur béton frais après projection :

Le béton frais, après projection, possède des caractéristiques rhéologiques (consistance) et physiques (masse volumique, compacité,...) qui sont dues au mode de mise en place.

Pour la voie sèche, les essais normalisés de mesure de consistance, de compacité et de masse volumique devraient se réaliser après un prélèvement *in situ* du béton frais suivi d'une mise en place dans un récipient par damage ou vibration.

Ils ne peuvent donc être utilisés car, avec cette méthode, les caractéristiques du béton, remanié lors du prélèvement, sont différentes de celles du béton qui a été mis en place.

De ce fait, il n'existe actuellement pas d'essai normalisé après projection, applicable au béton frais mis en œuvre par projection voie sèche.

Avec la projection par voie mouillée à flux dense et à flux dilué, les procédures normalisées concernant les mesures de masse volumique et de consistance ne peuvent être appliquées puisqu'elles nécessitent toutes des compactages différents de ceux obtenus par la projection.

Ces mesures ne sont pas pratiquées du fait de leur faible intérêt et du peu de modifications au béton apportées par les techniques de projection par voie mouillée.

2.4.2. Essais sur béton durci

Ces essais énumérés dans le tableau 8 de la norme NF EN 14487-1 de mars 2006 dans son article 5.5 intitulé " Exigences relatives au béton projeté durci " sont réalisables à partir du moment où il est possible de prélever, par carottage ou sciage, des éprouvettes de béton projeté (dans des caisses ou *in situ*).

Il s'agit des mesures de résistance à la compression, densité, module d'élasticité, résistance à la flexion, à la pénétration d'eau, au gel-dégel.

Pour les bétons projetés renforcés par des fibres, les essais sont les suivants :

- Teneur en fibres dans le béton en place (EN 14488-7),
- Résistance à la flexion sur prisme (EN 14488-3)
- Flexion centrée sur dalle (EN 14488-5 capacité d'absorption d'énergie).

2.5 ESSAIS NON NORMALISES UTILISES POUR LE BETON PROJETE

2.5.1 Essais sur béton frais spécifiques au béton projeté

2.5.1.1 Mesure de la masse volumique après projection

2.5.1.1.1 Cas de la voie sèche :

Avec cette méthode de projection, le compactage dû au martèlement des granulats est très important, l'échantillon destiné à la mesure de la masse volumique doit donc avoir été réalisé par projection.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour confectionner cet échantillon :

- a) En le prélevant à l'aide d'un récipient cylindrique en tôle, peu profond et à bord coupant, que l'on enfonce dans le béton venant d'être projeté.

Cette opération remanie malheureusement l'échantillon et réduit sa compacité, donc sa masse volumique, près de la zone de coupe.

Il est par ailleurs difficile de savoir s'il ne reste pas de vides au fond du récipient à la fin de l'enfoncement de la trousse coupante.

Cet essai est néanmoins utilisé, en particulier par la SNCF, avec un récipient d'un litre, surtout pour exploiter la mesure de teneur en fibres in situ des bétons projetés fibrés.

Compte tenu des risques opératoires qui ont été cités, l'essai ne peut donner qu'une indication dont la marge d'erreur peut aller jusqu'à $\pm 5 \%$

- b) En prélevant directement sur l'ouvrage, à l'aide d'une truelle, du béton venant d'être projeté.

Cette opération remanie totalement le béton dont on s'efforce ensuite de reconstituer la compacité en le tassant manuellement dans un récipient en matériau résistant et non absorbant, de volume connu.

Le tassement peut se faire par couche de 4 à 5 cm, à l'aide d'un simple pilon, en tentant de retrouver dans le moule la consistance mesurée au pénétromètre de poche sur le béton en place. Le même pénétromètre est utilisé pour contrôler le compactage de chaque couche, après damage.

Cette méthode est plus précise que la précédente bien que le ressuage dû au tassement par pilonnage dans le récipient modifie l'aspect de la surface visible du béton qui semble plus mouillé que sur le parement projeté.

- c) En projetant directement le béton dans un récipient en matériau non absorbant et résistant à la projection. Pour limiter les "effets de bord" le récipient jouant le rôle de moule doit être de faible profondeur (4 à 5 cm pour les moules de 1 à 2 dm³) et éventuellement les bords peuvent être inclinés.

Avec cette méthode, le compactage est bien pris en compte et les nids de pertes dans les angles sont négligeables (voire nuls lorsque les bords sont inclinés).

Le volume du récipient collecteur peut être facilement déterminé par pesage au gramme près une fois qu'il a été rempli d'eau.

Le surfaçage de la face vue est la seule difficulté. Sa coupe doit se faire avec une règle d'arasement biseautée déplacée sur les bords usinés du moule avec un mouvement alternatif de cisaillement. Les arrachements éventuels, dus à des gravillons ou des fibres doivent être comblés et lissés à la truelle.

La méthode « c » est celle que l'on recommande à ce jour mais l'évaluation de la masse volumique du béton en place reste délicate.

2.5.1.1.2 Cas de la voie mouillée :

Avec cette méthode de projection, le compactage dû au martèlement des granulats est moins important qu'en voie sèche mais il existe. L'échantillon destiné à la mesure de la masse volumique doit donc également être réalisé par projection mais le risque de piégeage de pertes étant faible, il devient possible de projeter directement dans un récipient de 5 dm³ (la dérogation à 2 dm³ n'est pas souhaitable dans ce cas) en suivant les mêmes précautions que pour la méthode « c » ci-dessus.

La méthode d'essais peut donc largement s'inspirer de la norme européenne EN 12350-6 sans toutefois être intégralement respectée puisque dans cette norme, l'échantillon prélevé doit être compacté par vibration ou manuellement.

En dehors des prescriptions concernant le compactage, toutes les autres préconisations de la norme EN 12350-6 peuvent être appliquées y compris les données relatives à la fidélité de son tableau 1.

Plus simplement, la méthode « c », décrite ci-dessus pour la voie sèche, peut être utilisée.

2.5.1.2 Mesure de la consistance

2.5.1.2.1 Cas de la voie sèche :

La consistance de l'échantillon prélevé ne peut être restituée de façon équivalente à celle obtenue par compactage lors de la projection.

Le contrôle qui est qualitatif et/ou quantitatif s'effectue sur le béton en place non remanié.

- Contrôle qualitatif

Des tests manuels très simples sont pratiqués depuis toujours par les porte-lances expérimentés qui apprécient la résistance à l'enfoncement de leur pouce (ou d'une pointe en acier de Ø 2 à 4 mm) dans le béton en place.

- Contrôle quantitatif

Il peut s'effectuer par exemple à l'aide d'un pénétromètre mesurant des réactions allant de 0 à 11 daN et dont la pointe conique a un angle de 60° pour une base de 8 mm de diamètre.

Des pointes différentes peuvent également convenir.



Des détails sur l'utilisation de ce type de pénétrömètre de poche sont donnés dans la partie B du fascicule contrôle.

Ce test peut être prescrit comme essai de contrôle pour des personnes n'ayant pas l'expérience d'un porte-lance qualifié.

2.5.1.2.2 Cas de la voie mouillée :

Aucun appareil de mesure de la consistance, spécialement adapté à la projection par voie mouillée, n'est actuellement commercialisé mais certains ont été mis au point par des laboratoires, parfois en modifiant des matériels conçus pour d'autres usages.

Par exemple, pour les bétons très fluides, un cône semblable à ceux employés pour mesurer la viscosité des coulis d'injection (cône de Marsh) mais équipé d'un très gros ajutage (20 à 50 mm) et éventuellement prolongé par un coude, peut être utilisé.

La résistance à la pénétration d'un tuyau en caoutchouc, dans un béton fluide à plastique, peut également être mesurée avec un dynamomètre comme le pénétrömètre de poche décrit dans le paragraphe précédent (2.5.1.2.1.).

Par rapport à l'essai normalisé d'affaissement, les 2 mesures citées ci-avant présentent l'avantage de renseigner sur l'aptitude au pompage, que l'on peut appeler la "pompabilité" du béton qui doit être introduit dans la pompe et poussé dans le tuyau.

Elles sont par ailleurs simples et rapidement faites.

2.5.2 Essais sur béton frais non spécifiques au béton projeté

2.5.2.1 Mesure de la consistance du béton frais

De nombreux essais, non normalisés, ont été mis au point pour estimer la consistance et diverses autres propriétés du béton frais, coulé dans un coffrage, puis mis en place par compactage manuel ou par vibration.

Pour la voie sèche, ces essais ne pourraient être réalisés qu'après projection mais comme ils n'ont, sauf exception, aucune utilité, ils ne sont jamais prescrits pour contrôler, sur les chantiers, la qualité des bétons projetés.

Pour la voie mouillée à flux dilué, le problème de pompabilité n'étant pas un point critique, les essais sur béton frais avant projection sont inutiles et ceux après projection n'ayant qu'un très faible intérêt ne sont, comme pour la voie sèche, pas pratiqués sur chantier.

Pour la voie mouillée à flux dense, l'estimation de la consistance est en revanche très utile avant la projection, pour vérifier que le béton destiné à être introduit dans la pompe est conforme aux prescriptions et qu'il peut être pompé et transporté dans le tuyau jusqu'à la lance, puis projeté.

Après projection, les essais sont faisables mais, comme pour les autres méthodes, leur intérêt étant minime, ils ne sont jamais exigés pour les contrôles sur chantier.

La plupart des essais sur béton frais non normalisés, initialement conçus pour les bétons coulés et utilisables pour le béton projeté avec parfois une adaptation d'échantillonnage, donnent généralement des résultats pertinents et fiables, à condition évidemment, qu'ils soient réalisés selon une procédure précise, définie par le constructeur de l'appareillage ou par le laboratoire qui l'a mis au point.

Compte tenu de ce qui a été précisé précédemment au sujet de la faisabilité et de l'utilité des essais sur béton frais pour contrôler les bétons projetés, seuls ceux concernant les mesures de consistance et/ou de maniabilité applicables à la voie mouillée et réellement pratiqués sur les chantiers français sont décrits sommairement dans les paragraphes suivants.

2.5.2.1.1 Essai utilisant un « plasticimètre » à palettes

Cet essai est cité en premier car l'appareil qu'il utilise est léger, peu coûteux et que la mesure est rapidement faite. Pour ces raisons c'est de loin le plus pratiqué sur les chantiers, après l'essai normalisé d'affaissement NF EN 12350-2.

L'appareil est constitué d'une tige munie de palettes à son extrémité inférieure et surmontée d'un dynamomètre à poignée tournante.

La tige ayant été descendue verticalement dans le béton jusqu'à ce que les palettes y soient totalement plongées, la poignée est tournée manuellement d'un demi-tour. Cette poignée est reliée à la tige par un accouplement comportant le système de mesure.

Le mouvement de rotation de la poignée est transmis à la tige par l'intermédiaire d'un ressort spiral fixé à une de ses extrémités sur la tige et à l'autre sur la poignée. La déformation maximale du ressort, qui est fonction de la résistance rencontrée par les palettes pendant leur rotation dans le béton, peut être mesurée et lue directement sur la poignée grâce à un index.

La corrélation entre les valeurs mesurées et celles de l'essai d'affaissement (NF EN 12350-2) étant satisfaisante pour les bétons courants, le constructeur de l'appareil a gradué l'échelle de lecture en centimètres d'affaissement.

Le choix de cette unité peut se justifier car un changement d'opérateur affecte peu la corrélation et que l'estimation de la consistance des bétons par un nombre de centimètres d'affaissement est la plus usitée en France.

Elle est néanmoins contestable, d'abord parce que le plasticimètre mesure une force alors que l'essai d'affaissement mesure une déformation mais surtout parce que l'information donnée par le plasticimètre peut se suffire à elle-même. Cette information pourrait par exemple être traduite en daN ou tout simplement, être considérée comme un indice, de cisaillement ou de viscosité, sans dimension.

En appliquant cette dernière proposition, l'indice, mesuré en quelques secondes, permet d'estimer l'aptitude du béton à être pompé et projeté, aussi bien sinon mieux que l'essai d'affaissement normalisé.

L'essai peut être renouvelé fréquemment, par exemple plusieurs fois au cours du déchargement d'une toupie de BPE, ce qui permet, lorsque l'indice est descendu à une valeur à laquelle le responsable de la projection sait qu'il y a risque de bouchage, de faire un essai d'affaissement et d'arrêter l'approvisionnement de la pompe s'il est confirmé que le béton n'est plus conforme à la prescription concernant la consistance.

En résumé, le plasticimètre à palettes, très utile sur les chantiers pour contrôler fréquemment l'aptitude au pompage du béton, doit être confirmé par un essai normalisé lorsqu'il a révélé que les limites de la classe de consistance prescrite risquaient d'être dépassées et qu'il y a un risque de litige pour non-conformité.

Rappelons que le plasticimètre à palettes ne doit pas être utilisé pour des mortiers ou des bétons de sable très fluides qui ont des affaissements supérieurs à 20 cm mesurés au cône d'Abrams (EN 12350-2). Dans ce cas l'essai d'étalement sous cône d'Abrams (NF EN 12350-8) décrit au § 2.4.1.1.2 peut être utilisé.

2.5.2.1.2 Essai utilisant un « Pompabilimètre »

L'aptitude d'un béton très fluide à être pompé et introduit dans un tuyau de diamètre relativement faible afin d'être projeté, est une propriété qu'il est très important de connaître avant que la pompe ne soit mise en marche pour propulser ce béton vers la lance.

On a vu que le plasticimètre à palettes pouvait être utilisé mais qu'il ne convenait pas pour des bétons très fluides.

Le mot « pompabilimètre » qui est appliqué dans ce guide aux appareils permet d'évaluer rapidement l'aptitude du béton à être pompé et surtout transporté dans un tuyau de faible diamètre (25 à 50 mm) sur une distance de 50 à 150 m ou plus. Ce néologisme a le mérite de ne pas nécessiter de définition.

Comme cela a été indiqué, pour les mesures de consistance avant projection en voie mouillée, il est possible d'employer des essais utilisés pour les bétons auto-plaçants mais le « pompabilimètre » qui permet d'évaluer la pompabilité en quelques secondes à l'aide d'un simple pénétromètre de poche est le plus pratique.

Avec des embouts appropriés il permet de tester aussi bien un mélange classique qu'un béton de sable très fluide.



Mesure au « pompabilimètre » de poche, avant de charger la pompe

2.5.2.1.3 Autres essais

Pour mesurer la consistance du béton frais, des appareils de laboratoire tels que les scissomètres et rhéomètres ont été mis au point mais leur utilisation pour faire des contrôles sur chantier au moment de la projection n'est pas envisageable.

Un petit scissomètre de poche existe. Il pourrait être utilisé pour les contrôles sur chantier, comme le pompabilimètre décrit dans le paragraphe précédent. Toutefois des essais comparatifs de faisabilité, de répétabilité et de détermination des limites des plages de consistance, restent à faire avant de recommander son emploi.

2.5.3 Essais sur béton durci non spécifiques au béton projeté

2.5.3.1 Essais non destructifs sur chantier

2.5.3.1.1 Sondage sonique au marteau

Cette auscultation par sondage manuel au marteau, est préconisée dans les normes de nombreuses nations et en particulier en France (NF P 95-102), souvent de manière systématique, sur l'ensemble de la surface projetée d'un ouvrage réparé ou renforcé.

Ce sondage au marteau a pour objectif de déceler et repérer dès que le béton projeté a suffisamment durci (par exemple après 24 heures) les zones décollées du support.

Malheureusement cette préconisation n'est accompagnée d'aucune méthode d'essai.

L'auscultation au marteau reste néanmoins le moyen le plus efficace pour détecter les plaques de béton projeté décollées et susceptibles de se détacher.

Elle permet également de déterminer des zones non décollées mais émettant ce qui est généralement qualifié de "son creux".

Ces zones peuvent facilement être délimitées avec une précision décimétrique mais la caractérisation des sons repérés "à l'oreille" est subjective et mal définie.

Un guide, décrivant la procédure de l'auscultation (types de marteaux, écartement des frappes, etc.) et définissant des termes permettant de mieux caractériser les sons, est développée dans la partie B du fascicule contrôle.

2.5.4 Essais sur béton durci spécifiques au béton projeté

2.5.4.1 Résistance aux très jeunes âges

Depuis que le béton projeté est utilisé en travaux souterrains, notamment pour ce qui a été appelé la "Nouvelle Méthode Autrichienne", une résistance du béton suffisante pour assurer le soutènement dans le délai le plus court possible a toujours été recherchée.

Malheureusement, nous avons vu que le prélèvement d'un échantillon par carottage, est pratiquement impossible tant que la résistance à la compression du béton n'a pas dépassé 10 MPa car des granulats se détachent et tournent avec le carottier diamanté.

Diverses méthodes ont donc été imaginées pour résoudre ce problème afin d'estimer la résistance d'un béton projeté jeune, en dehors de celles mises au point en Autriche pour les travaux souterrains (reprise dans la norme NF EN 14488-2 décrites dans le présent fascicule en 2.3.2).

La procédure suivante, mise au point par la SNCF, est notamment pratiquée :

2.5.4.1.1 Procédure R.I.G. (Résistance Initiale Garantie)

Pour une raison différente de celle de la création rapide d'un soutènement, la SNCF a demandé aux entreprises de projeter, pour des travaux réalisés dans des tunnels en exploitation, un béton ayant rapidement une résistance suffisamment élevée pour que la circulation des trains puisse être rétablie environ 3 heures après sa projection.

La procédure R.I.G. sert à qualifier des mélanges de base secs, fabriqués en usine et permettant d'obtenir, à la température de 10°, une résistance ≥ 3 MPa après 3 heures.

Pour cela le carottage est remplacé, pour les essais à 3, 5 et 24 h, par le sciage de cubes de 10 cm de côté, dans des dalles projetées. Le carottage est conservé pour les éprouvettes destinées aux essais à plus long terme (à 7, 28 et éventuellement 90 jours).

Résultats à obtenir pour être admis sur la liste d'aptitude de la SNCF et pour les contrôles sur site sont les suivants :

à 3 heures :	≥ 3 MPa	si la température est de 10°C	$\geq 1,5$ MPa	si t = 2°C
à 24 heures :	≥ 10 MPa		et à 28 jours :	≥ 25 MPa

3. FREQUENCES MINIMALES DES CONTROLES

Les fréquences minimales des échantillonnages sont définies dans le tableau 12 de la norme NF EN 14487-1.

Il est indispensable de se reporter à ce tableau très important.

Dans ce tableau il est fait référence à 3 « catégories » de niveaux d'inspection.

- La catégorie 1 concerne les ouvrages ne nécessitant qu'un faible niveau d'inspection
- La catégorie 2 concerne les ouvrages nécessitant un niveau d'inspection moyen
- La catégorie 3 concerne les ouvrages nécessitant le plus haut niveau d'inspection

CATEGORIES D'INSPECTION

Ces catégories tiennent compte des risques encourus par les ouvrages (stabilité, pérennité), par leurs usagers et leurs riverains et par leur environnement (ouvrages voisins, habitations, etc.).

Compte tenu de la grande diversité des ouvrages et du nombre important des facteurs de risques matériels et humains les concernant ainsi que leur environnement, il n'a pas été possible de déterminer de manière exhaustive les catégories d'inspection.

Des exemples, permettant de déterminer ces catégories d'inspection pour différents types d'ouvrages soumis à différents niveaux de risques, ont néanmoins été donnés dans l'annexe A (informative) de la norme NF EN 14487-1.

Ces exemples de catégories d'inspection figurent dans les tableaux A.1, A.2, A.3 et A.4 de l'annexe A de cette norme, **à laquelle il est indispensable de se reporter.**

3.1.1 Tableau A1

Réparation ou renforcement de structures et de composants non-porteurs

- **La catégorie 1** peut s'appliquer lorsque les exigences de durabilité sont mineures et que les risques pour les utilisateurs et les résidents sont faibles (par exemple en zone non urbaine)
- **La catégorie 2** peut s'appliquer lorsque les exigences de durabilité sont modérées et que les risques pour les utilisateurs et les résidents sont moyens (par exemple maisons et petits immeubles)
- **La catégorie 3** s'applique lorsque les exigences de durabilité et les risques pour les utilisateurs et les résidents sont élevés (par exemple hôpitaux, tunnels à fort trafic)

3.1.2 Tableau A2

Réparation ou renforcement de structures et de composants porteurs

- **Catégorie 1** ne peut pas s'appliquer.
- **Catégorie 2** peut s'appliquer par exemple aux égouts en petite zone urbaines
- **Catégorie 3** peut s'appliquer par exemple aux hôpitaux, grands immeubles

3.1.3 Tableau A3

Soutènements

- **Catégorie 1** peut s'appliquer par exemple aux stabilisations de pentes faibles
- **Catégorie 2** peut s'appliquer par exemple au béton projeté pour soutènement provisoire en tunnel
- **Catégorie 3** peut s'appliquer par exemple aux tunnels avec fort trafic

3.1.4 Tableau A4

Structures indépendantes

- **Catégorie 1** peut s'appliquer par exemple aux rochers factices décoratifs
- **Catégorie 2** peut s'appliquer par exemple aux petites piscines
- **Catégorie 3** peut s'appliquer par exemple aux rochers factices accessibles au public

Remarque :

Les ouvrages en béton projeté, telles que les maisons de formes libres, les piscines, les pistes de bobsleigh, les murs d'escalade, les faux rochers, etc. étaient au préalable appelés en France « ouvrages neufs ».

Cette dénomination a été en particulier utilisée dans les fascicules « présentation » et « dimensionnement » du guide mis en ligne sur le site ASQUAPRO avant que « structures indépendantes » soit adopté dans la version définitive de la norme EN 14487-1.

Nota : La définition des « structures indépendantes » a été créée, à la demande de la France, dans la norme NF EN 14487-1 (à l'article 3.5.1).