

**Qualité du BP
Fascicule 5**

**Contrôles
Partie B**

Réalisation sur chantier des essais de contrôle

Affaissement au cône d'Abrams (essai NF EN 12350-2)



Piquage tige Ø 16 dans le cône rempli de béton



Mesure de l'affaissement avec la toise
(Photos Eric Marsollat)

Réalisation sur chantier des principaux essais de contrôle

AVANT-PROPOS

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

- partie A : Problématique du contrôle du béton projeté et description des méthodes d'essais
- partie B : Réalisation sur chantier des principaux essais de contrôle

Le présent document constitue la version 2013 de la partie B du fascicule « contrôles ». Il remplace la version précédente de 2010.

Il ne concerne que les opérations les plus couramment utilisées **sur les chantiers** pour contrôler la qualité de la projection,

- ⇒ soit au titre du contrôle interne qui permet à l'entreprise de vérifier, durant les travaux, qu'elle respecte bien les prescriptions de son contrat et celles du plan d'assurance qualité.
- ⇒ soit pour exécuter les essais sur béton frais, prélever ou projeter des échantillons destinés aux essais de laboratoire exigés pour les contrôles externes ou extérieurs..

SOMMAIRE

	N° de page
Affaissement au cône d'Abrams (essai NF EN 12350-2).....	2
AVANT-PROPOS	3
INTRODUCTION.....	6
DOCUMENTS DE REFERENCE.....	6
Documents spécifiques au béton projeté	6
Normes « béton » utilisables pour la projection.....	7
1 PROBLEMATIQUE DU CONTROLE DU BETON PROJETE	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 Présence de fibres:	9
1.1.3 Enrobage des armatures	9
2 OPERATIONS DE CONTRÔLE REALISEES SUR CHANTIER	10
2.1 Présentation	10
2.2 Essai de la norme NF P 95 102	10
2.2.1 Réalisation des échantillons projetés	10
Confection des caisses.....	10
Projection du béton.....	11
2.3 Essais normalisés spécifiques au béton projeté.....	12
2.3.1 NF EN 14488-1 Échantillonnage de béton frais et de béton durci	12
2.3.2 NF EN 14488-2 Essais de résistance en compression au jeune âge.....	12
2.3.2.1 Principe des essais	12
2.3.2.2 Pénétration d'une aiguille (essai A).....	12
2.3.2.3 Enfouissement et arrachement d'un clou fileté (essai B).....	13
2.3.3 NF EN 14488-3 béton projeté fibré : essai en flexion sur prisme.....	13
2.3.3.1 Historique	13
2.3.3.2 confection des éprouvettes sur chantier	13
2.3.4 NF EN 14488-4 Essai d'adhérence en traction directe.....	14
2.3.4.1 Prélèvement des carottes sur chantier.....	14
2.3.5 NF EN 14488-5 capacité d'absorption d'énergie d'une dalle fibrée.....	16
2.3.5.1 Principe de l'essai	16
2.3.5.2 Confection des dalles sur le chantier	16
2.3.5.2.1 Coffrage.....	16
2.3.5.2.2 Projection	16
2.3.6 NF EN 14488-6 mesure de l'épaisseur du béton sur un support	17
2.3.7 NF EN 14488-7 teneur en fibres du béton renforcé par des fibres	18
2.3.7.1 Importance de l'essai sur site.....	18
2.3.7.2 Principe de l'essai	18
2.3.7.2.1 Méthode A (béton durci).....	18
2.3.7.2.2 Méthode B (sur béton frais).....	19
2.4 Essais normalisés non spécifiques au béton projeté	20
2.4.1 Essais sur béton frais.....	20
2.4.1.1 Essais avant projection	20
2.4.1.1.1 Cas de la voie sèche :	20
2.4.1.1.2 Cas de la voie mouillée à flux dense.....	20
2.4.1.1.3 Cas de la voie mouillée à flux dilué :	24
2.4.1.2 Essais sur béton frais après projection :	25
2.4.1.2.1 Cas de la voie sèche :	25
2.4.1.2.2 Cas de la voie mouillée à flux dense.....	25
2.4.1.2.3 Cas de la voie mouillée à flux dilué	26
2.4.2 Essais sur béton durci.....	26
2.4.2.1 Généralités	26
2.4.2.2 Calcul de la masse volumique NF EN 12390-7	26

2.4.2.3	Profondeur de pénétration d'eau sous pression NF EN 12390-8	26
2.4.2.4	Détermination de l'indice de rebondissement NF EN 12504-2	27
2.5	Essais non normalisés utilisés pour le béton projeté	27
2.5.1	Essais sur béton frais spécifiques au béton projeté	27
2.5.1.1	Mesure, sur béton frais, de la masse volumique après projection	27
2.5.1.1.1	Cas de la voie sèche :	27
2.5.1.1.2	Cas de la voie mouillée :	28
2.5.1.2	Mesure de la consistance.....	29
2.5.1.2.1	Cas de la voie sèche :	29
2.5.1.2.2	Cas de la voie mouillée :	30
2.5.1.3	Mesure de la teneur en eau du béton en place	30
2.5.1.3.1	Cas de la voie sèche	30
2.5.1.3.2	Cas de la voie mouillée	31
2.5.1.4	Tamisage sous l'eau d'un échantillon du béton en place	32
2.5.1.4.1	Cas de la voie sèche	32
2.5.1.4.2	Cas de la voie mouillée	33
2.5.1.5	Analyse granulométrique du refus sur tamis de 0.080 mm	33
2.5.2	Essais sur béton frais non spécifiques au béton projeté.....	34
2.5.2.1	Mesure de la consistance du béton frais.....	34
2.5.2.1.1	Essai utilisant le plasticimètre à palettes.....	35
2.5.2.1.2	Pompabilimètres.....	36
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
2.5.3.1.2	Mesures d'indices sclérométriques	41
2.5.4	Essais sur béton durci spécifiques au béton projeté	43
2.5.4.1	Résistance aux très jeunes âges	43
2.5.4.1.1	Procédure "R.I.G." (Résistance Initiale Garantie).....	43
3	FREQUENCES DES ESSAIS ET MESURES	44
3.1	Catégories d'inspection	44
3.2	Tableau des fréquences minimales	45

INTRODUCTION

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

La présente partie B du fascicule « contrôles » du guide Asquapro 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 spécifiques au béton projeté

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)

NF EN 14487-1	mars 2006	Béton projeté Partie 1 : définitions, spécifications et conformité
NF EN 14487-2	avril 2006	Béton projeté Partie 2 : Exécution
NF EN 14488-1	octobre 2005	Essais pour béton projeté Partie 1 échantillonnage de béton frais et de béton durci
NF EN 14488-2	octobre 2006	Essais pour béton projeté Partie 2 : résistance à la compression au jeune âge du béton projeté

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

Recommandations AFTES

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

Normes « béton » utilisables 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 » mais utilisables pour le béton projeté :

- *Mesure de la teneur en eau du béton frais après projection*
- *Mesure de la teneur en ciment + fines du béton frais après projection*
- *Mesure de la consistance au pénétromètre du béton frais après projection (voie sèche)*
- *Estimation de la consistance du béton frais au plasticimètre manuel (voie mouillée)*
- *Sondage sonique au marteau sur béton durci pour contrôler l'adhérence au support*

1 PROBLEMATIQUE DU CONTROLE DU BETON PROJETE

Ce sujet a été traité dans le chapitre 1 de la partie A du fascicule « Contrôles », il ya donc lieu de s'y reporter pour obtenir tous les détails sur les raisons qui ont conduit à la mise au point de méthodes d'essais particulières.

Nous ne rappelons ci-après que les principales particularités dues à la mise en œuvre.

1.1 Particularités dues à 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, lorsqu'elle est faite par voie sèche, entraîne une augmentation importante de la teneur en ciment dans le béton en place et, par conséquent, de sa résistance.

Avec la voie mouillée l'enrichissement en ciment est très faible, voire nul mais la projection modifie néanmoins la composition du fait du compactage produit, comme en voie sèche, par le martèlement des granulats.

La composition du béton en place étant par conséquent, 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, la confection d'échantillons ou d'éprouvettes par coulage dans des moules n'étant pas représentative.

1.1.2 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.

1.1.3 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.**

2 OPERATIONS DE CONTRÔLE REALISEES SUR CHANTIER

2.1 Présentation

Dans la partie A du fascicule « contrôle », les méthodes d'essais, normalisées ou non, utilisables pour contrôler la qualité du béton projeté, ont été succinctement décrites.

Seules les opérations devant être exécutées sur les chantiers, aussi bien par les entreprises que par les bureaux d'études ou les laboratoires, pour que ces méthodes d'essais soient réalisées, **font l'objet de la présente partie B.**

Pour faciliter la navigation entre les parties A et B du fascicule « contrôles » les différentes opérations « sur chantier » seront examinées dans le même ordre que les descriptions des essais sont classées dans la partie A. à savoir :

- Essais normalisés spécifiques au béton projeté
- Essais normalisés non spécifiques au béton projeté
- Essais non normalisés utilisés pour le béton projeté

La norme NF P 95-102 utilisée en France n'est pas encore supprimée. Elle n'est par ailleurs pas en contradiction avec la norme NF EN 14487-1.

Le seul essai qu'elle prescrit (résistance à la compression) pourra donc être conservé, car il est utilisable tout en respectant la norme européenne.

Comme cela a été fait dans la partie A, il est donc le premier examiné.

2.2 Essai de la norme NF P 95 102

Cet essai est destiné à mesurer la résistance à la compression du béton sur des éprouvettes, prélevées par carottage dans des échantillons projetés dans des caisses, avant ou pendant la réalisation de travaux.

Les dimensions des caisses, les zones de carottage et les dimensions des carottes à prélever sont décrites dans la partie A du fascicule « contrôles », auquel il est conseillé de se reporter.

2.2.1 Réalisation des échantillons projetés

Confection des caisses

Lorsque les caisses sont confectionnées sur les chantiers, elles sont le plus souvent entièrement en bois. Lorsque la projection est faite par voie sèche, les bords peuvent être à claire-voie pour ne pas piéger les pertes (voir photo page suivante).

Si des bacs en matière plastique, en tôle ou tout autre matériau sont utilisés, une plaque de bois doit être mise en place sur le fond devant recevoir la projection.

Projection du béton

Le béton doit être projeté dans les caisses, dans des conditions rigoureusement identiques à celles des travaux (pour le personnel, les constituants et le matériel).

La projection se fait, sur une épaisseur de 15 cm dans la zone de carottage perpendiculairement au fond de la caisse placée verticalement ou avec une inclinaison inférieure à 20 ° sur la verticale.

Il faut rappeler que cette position de la caisse ne peut être respectée lorsqu'un béton non accéléré est projeté par voie mouillée. Dans ce cas, il est autorisé de poser la caisse horizontalement.

La distance de projection de 1 mètre donnée à titre indicatif dans la norme peut être diminuée pour se rapprocher de la distance adoptée sur le chantier lorsque par exemple la projection doit se faire dans une galerie très étroite.

Inversement, lorsque des machines à très gros débit sont employées, l'essai doit être réalisé avec une distance de projection du même ordre que celle utilisée pour les travaux.



Exemple de projection par voie sèche d'un béton accéléré dans une caisse à bords ajourés.

2.3 Essais normalisés spécifiques au béton projeté

2.3.1 NF EN 14488-1 Échantillonnage de béton frais et de béton durci

Cet échantillonnage qui constitue la partie 1 de la norme EN 14488, concerne directement l'essai AFNOR décrit précédemment, 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.

Pour ce qui concerne les dimensions des carottes, la norme 14488-1 ne donne aucune prescription, il faut consulter la norme NF EN 14487-1 pour trouver que « *Leur diamètre minimal doit être de 50 mm et le rapport hauteur/diamètre doit être égal à 1 ou 2* ».

Ces prescriptions sont moins exigeantes que les françaises (carotte \varnothing 60 mm avec élancement 2)

Compte tenu du nombre d'essais réalisés en France depuis 1972 sur des carottes de \varnothing 60 mm et d'élancement 2, il est recommandé, lorsque c'est possible, de conserver ces dimensions mais on peut si c'est nécessaire descendre à \varnothing 50 mm élancement 1 tout en respectant la norme NF EN 14487-1.

La norme 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 2.2.1.2 (*notée en italique gras*) du présent document reste valable.

2.3.2 NF EN 14488-2 Essais de résistance en compression au jeune âge

2.3.2.1 Principe des essais

Ces essais se réalisent sur les chantiers mais nécessitent un matériel spécifique qui ne doit être employé que par des ingénieurs ou techniciens appliquant les procédures décrites dans la norme.

Pour les grands chantiers, le matériel peut être sur le site et utilisé par le personnel de l'entreprise pour les contrôle internes mais le plus souvent ces essais sont réalisés par un laboratoire extérieur.

La norme prévoit 2 essais :

- L'essai A pour béton très jeune (résistance allant de 0,2 à 1,2 MPa)
- L'essai B pour béton moins jeune (résistance allant de 3 à 16 MPa)

2.3.2.2 Pénétration d'une aiguille (essai A)

Cet essai qui utilise la mesure de la force nécessaire pour faire pénétrer une aiguille dans le béton jeune, est d'une grande utilité sur chantier car il permet, en quelques minutes, d'estimer la résistance à la compression d'un béton très jeune.

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.

2.3.2.3 Enfouissement et arrachement d'un clou fileté (essai B)

Cet essai 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 de pénétration d'aiguille qui a généralement été pratiqué sur ce même béton projeté lorsqu'il était plus jeune.

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

2.3.3.1 Historique

Des essais de comportement d'éprouvettes prismatiques soumises à des essais de flexion ont d'abord été mis au point au Japon en 1984 (JSCE-SF4), aux USA en 1989 (essai ASTM C1018-89), en France en 1993 (NF P 18409).

Ces essais étaient à l'origine destinés aux bétons fibrés mis en œuvre par **coulage** mais ils ont vite été adaptés au béton projeté, simplement en réalisant les éprouvettes par sciage dans des dalles projetées.

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

Cet essai (en flexion 4 points) est proche de l'essai français de 1993, aux dimensions de l'éprouvette près, mais il comporte, en plus, une évaluation de la ductilité par examen de résistances résiduelles successives.

C'est cet essai suédois qui a été utilisé pour mettre au point la norme EN 14488-3

2.3.3.2 confection des éprouvettes sur chantier

La norme indique que les éprouvettes de 75 mm de hauteur, de 125 mm de largeur et d'au moins 500 mm de longueur sont sciées, en laboratoire, dans un échantillon projeté sur chantier, dans un bac en matériau non absorbant.

Sur le chantier, les bacs confectionnés doivent avoir des dimensions suffisantes pour que les dalles obtenues après décoffrage permettent d'y découper 3 éprouvettes (des bacs de 500 mm x 700 mm et de 100 mm d'épaisseur environ peuvent convenir).

La qualité de la projection ayant une grande importance, celle-ci doit être réalisée en présence d'un responsable du contrôle externe ou à défaut par celui du contrôle interne.

Cette projection doit être exécutée, par les opérateurs certifiés chargés les travaux, avec les matériaux et les matériels qui seront utilisés (dans le cas d'essais de convenance) ou qui sont en cours d'utilisation (dans le cas d'essais de contrôle).

Le porte-lance doit prendre le temps de bien régler le mouillage à la lance pour obtenir la consistance recherchée avant de projeter dans la caisse.

Il doit ensuite commencer par les arêtes (voir photo) et faire tout son possible pour ne pas piéger des pertes dans la dalle.

La prescription de pose de la caisse à moins de 20 degrés du plan vertical comme pour la NF EN 14888-1 et citée en 2.3.1, ne s'applique que pour les bétons (accélérés ou non) projetés par voie sèche, ainsi que pour les bétons **accélérés** projetés par voie mouillée.

Comme cela a été indiqué en 2.2.1.2, elle ne peut l'être lorsqu'un béton non accéléré est projeté par voie mouillée, dans ce cas la caisse est posée horizontalement.

Dans tous les cas, le transport de l'échantillon au laboratoire ne doit pas se faire avant 48 heures.

Au laboratoire, les éprouvettes sont sciées aux dimensions prescrites (125 x 75 x 500) et soumises à l'essai, les faces inférieures moulées étant celles à mettre en tension.

2.3.4 NF EN 14488-4 Essai d'adhérence en traction directe

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 appliqué 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 un support très rarement plan, d'un béton souvent projeté sur plus de 10 cm d'épaisseur.

La norme NF EN 14488-4 que nous examinons **ne concerne elle que le seul essai en traction directe réalisé en laboratoire sur des carottes prélevées dans l'ouvrage.**

L'essai in situ ne devrait donc plus être prescrit.

2.3.4.1 Prélèvement des carottes sur chantier

La qualité de ce prélèvement sur chantier est, de loin, l'opération la plus délicate et la plus importante de l'essai.

Contrairement à la partie réalisée en laboratoire avec le matériel exigé par la norme et suivant la procédure prescrite, il existe en effet peu ou pas de recommandations concernant le carottage sur site et il est souvent arrivé que des opérateurs, même venant de laboratoires réputés, ne possèdent, ni le matériel adapté, ni le savoir-faire.

Il est donc recommandé à l'entreprise que son responsable du contrôle interne vérifie que les carottages sont correctement réalisés, sachant qu'un chantier peut être arrêté à cause d'un prélèvement mal fait.

Le technicien de l'entreprise, chargé de vérifier l'exécution des carottages, doit s'assurer que :

- la carotteuse et le carottier sont en bon état (pas de jeu et diamants saillants)
- la carotteuse est parfaitement fixée par une cheville à expansion bloquée dans un forage de $\varnothing \geq 15$ mm et munie d'une vis avec écrou de serrage
- le carottage est bien fait avec une injection d'eau suffisante (pression et débit)
- l'avancement du carottier, réalisé manuellement, est bien régulier
- la profondeur du carottage est suffisante (voir ci-dessous)
- l'extraction de la carotte est faite avec précaution.

La norme préconisant que les éprouvettes soumises à la traction aient un diamètre "d" allant de 50 à 100 mm et qu'elles soient de longueur égale à 2 d, il est indispensable que la longueur totale carotée soit nettement supérieure à 2 d. Il faut en effet que le technicien du laboratoire puisse recouper transversalement chaque carotte à ses deux extrémités pour que la zone d'adhérence se situe le plus près possible du milieu de l'éprouvette.

Le technicien de l'entreprise doit donc vérifier que les carottes ont la bonne longueur et surtout que la partie forée dans le support soit bien suffisante.

Il doit marquer les carottes à l'encre indélébile et peut également les photographier

La mise en caisse des carottes est généralement faite par le technicien du laboratoire.



Carottage en voûte de tunnel pour contrôler l'adhérence en traction directe (photo Claude Resse)
Machine à moteur pneumatique (permettant le carottage en plafond)
Fixation du socle par une cheville à expansion avec tige filetée et écrou

2.3.4.2 Essais en laboratoire

Pour information, au laboratoire, 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.

Tous les détails sur la machine d'essai, 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, sont décrits dans la norme NF EN 14488-4.

Le laboratoire se doit d'appliquer scrupuleusement les prescriptions de cette norme, on voit donc que le point critique de l'essai se situe bien lors des carottages sur le chantier.

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

Pour le contrôle du béton projeté fibré, cet essai d'origine française que la SNCF, qui l'a mis au point, avait appelé « essais de flexion centrée sur dalle », est beaucoup plus utilisé en France que l'essai en flexion sur prisme décrit en 2.3.3.

Cet essai avait en effet été adopté par de nombreux pays d'Europe bien avant qu'il ait été normalisé par la Commission Européenne, puis qu'il ait acquis en juillet 2006, le statut de norme française NF EN.

2.3.5.1 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 de 100 x 100 mm placé au centre de la dalle et la flèche est mesurée.

L'aire située sous la courbe charges-flèches entre 0 et 25 mm donne l'énergie, en joules, absorbée pendant l'essai pour obtenir cette flèche.

2.3.5.2 Confection des dalles sur le chantier

2.3.5.2.1 Coffrage

Des caisses de dimensions intérieures 600 x 600 x 100 mm doivent être confectionnées avec du contreplaqué (CTBX ou coffrage bakélinisé) de 15 mm d'épaisseur minimale.

Contrairement aux essais de la norme NF EN 14488-1 (voir 2.3.1) pour lesquels les côtés des caisses peuvent être ajourés (car les éprouvettes sont les carottes), c'est la dalle entière qui constitue cette fois l'éprouvette testée par le laboratoire.

La norme indique que l'épaisseur de la dalle doit être de 100 + 0 à 5 mm une fois retournée à la règle immédiatement après la projection.

Bien qu'elle ne soit pas inscrite dans la norme, cette tolérance de 0 à + 5 mm peut être également appliquée aux côtés des caisses qui constituent les coffrages.

2.3.5.2.2 Projection

La qualité de la projection ayant une grande importance, celle-ci doit être réalisée en présence d'un responsable du contrôle externe ou à défaut par celui du contrôle interne.

Cette projection doit être exécutée, par les opérateurs certifiés chargés des travaux, avec les matériaux et les matériels qui seront utilisés (dans le cas d'essais de convenance) ou qui sont en cours d'utilisation (dans le cas d'essais de contrôle).

Lorsque la projection est faite par voie sèche, le porte-lance doit prendre le temps de bien régler le mouillage à la lance pour obtenir la consistance recherchée avant de projeter dans la caisse.

Il doit ensuite commencer par les arêtes (voir photo) et faire tout son possible pour ne pas piéger des pertes dans la dalle.

La prescription de pose de la caisse à moins de 20 degrés du plan vertical comme pour la NF EN 14888-1 et citée en 2.3.1, s'applique.

Rappelons que cette prescription n'est applicable que pour les bétons (accélérés ou non) projetés par voie sèche, ainsi que pour les bétons accélérés projetés par voie mouillée.

En revanche, comme cela a été indiqué en 2.2.1.2, elle ne peut l'être lorsqu'un béton non accéléré est projeté par voie mouillée, dans ce cas la caisse est posée horizontalement.

Le transport de l'échantillon au laboratoire ne doit pas se faire avant 48 heures.



Projection (par voie sèche) dans une caisse 600 x 600 x 100 pour l'essai NF EN 14888-5 (photo VNF)

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

Cette norme n'a pour objectif que de décrire une procédure de référence pour réaliser la mesure de l'épaisseur projetée.

Elle prescrit :

Pour le béton frais, donc pendant la projection (ou quelques secondes après dans le cas d'un béton accéléré) d'enfoncer une jauge de profondeur dans le béton projeté afin d'en mesurer l'épaisseur.

Pour le béton durci, de percer des trous ou de carotter le béton jusqu'au support, puis « la profondeur des trous ou la longueur des carottes extraites sont ensuite mesurées ». Il est demandé de percer 5 trous, espacés de 600 ± 50 mm, sur 2 lignes perpendiculaires ou de réaliser des carottes suivant le même schéma.

2.3.7 NF EN 14488-7 teneur en fibres du béton renforcé par des fibres

2.3.7.1 Importance de l'essai sur site

On sait que la teneur en fibres du béton en place peut être très différente du dosage qui a été préconisé pour le mélange de base et que, de ce fait, il est donc **préférable de connaître cette teneur, dès la projection**, pour éviter des déconvenues lors de la réception des résultats des essais sur béton durci (notamment pour les normes NF EN 14488-3 et NF EN 14488-5 décrites en 2.3.3 et 2.3.5).

La mesure de la teneur en fibre du béton durci ne pouvant être faite dès la projection, elle ne présente pas le même intérêt de "signal d'alarme" que la mesure sur béton frais. Elle peut cependant être utile, lorsque des essais sur béton frais n'ont pas été réalisés et que des résultats d'essais à 28 jours sur prismes ou dalles ne sont pas satisfaisants.

On voit que c'est la mesure sur bétons frais (voir méthode B ci-dessous) qui présente le plus grand intérêt et doit donc de préférence être prescrite.

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 NF EN 14488-7)

2.3.7.2.1 Méthode A (béton durci)

Pour cette méthode, seuls les carottages sont à faire sur le chantier, en prenant toutes les précautions décrites précédemment pour les réaliser. (voir au § 2.3.4.1).

Trois carottes de diamètre compris entre 50 et 100 mm doivent être prélevées dans le béton en place ou dans un panneau d'essai.

Leurs volumes sont déterminés, au laboratoire, par calcul d'après leurs dimensions mesurées ou par pesées dans l'eau conformément à l'EN 12350-6.

Chaque carotte est ensuite écrasée jusqu'à désagrégation complète pour séparer les fibres du béton, les récupérer et les peser.

2.3.7.2.2 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.

Leurs 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 les laissant pas passer.

Pour les fibres synthétiques, l'échantillon peut être imbibé d'alcool et agité jusqu'à ce que les fibres flottent à la surface. Pour certaines de ces fibres, comme celles de polypropylène (dont la densité est inférieure à 1), l'échantillon est plongé dans l'eau.

Les fibres 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.

On se rend compte que ces opérations ne peuvent être réalisées sur le chantier que par des techniciens munis d'un matériel de laboratoire.

Une méthode plus simple **mais non normalisée** peut néanmoins être utilisée lorsque le matériel permettant de faire la pesée hydrostatique n'est pas disponible sur le chantier.

Compte tenu du grand intérêt qu'il y a à connaître, au moment de la projection, la teneur en fibres in situ, cette méthode est couramment utilisée sur les chantiers français.

Les fibres sont récupérées et pesées dans l'air et leur poids comparé à celui de l'échantillon.

Si on mesure la masse volumique du béton frais après projection, ou si on connaît géométriquement le volume de l'échantillon, il est possible de calculer la teneur en fibres par mètre cube en place.

Ces méthodes sont décrites à l'article 2.5.1 (voir en particulier le § 2.5.1.1. c)

2.4 Essais normalisés non spécifiques au béton projeté

Comme cela a déjà été souligné la partie A du fascicule « contrôles » 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 qu'il soit besoin de les adapter.

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

Les essais qui n'étaient pas destinés à l'origine aux bétons projetés mais qui peuvent y être appliqués sont très nombreux mais ils ne sont pas 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 guide.

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 exister, pour cette méthode, d'essais sur béton frais avant projection.

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 du maître d'œuvre.

2.4.1.1.2 Cas de la voie mouillée à flux dense

2.4.1.1.2.1 *Mesure de la teneur en eau*

Avec la projection par voie mouillée à flux dense, 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.

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

Le seul intérêt de cette mesure pourrait être de vérifier, par exemple, à l'arrivée d'une toupie de BPE, la conformité aux prescriptions du béton livré mais, pour cela, la mesure de l'affaissement au cône (NF EN 12350-2 voir 2.4.1.1.2.3 ci-après) est suffisante.

2.4.1.1.2.2 *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.

Toutefois, 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 généralement plus faibles que celles des bétons coulés, un volume minimal de 2 dm³ pourrait être préconisé pour les bétons projetés.

Pourtant, même avec ce volume réduit de 2 dm³, cet essai de laboratoire (néanmoins faisable sur chantier), n'est généralement pas prescrit pour évaluer la masse volumique d'un béton projeté.

2.4.1.1.2.3 *Mesure de l'affaissement NF EN 12350-2*

L'essai normalisé pour béton frais le plus employé sur les chantiers français est, de loin, la mesure de la consistance au « cône d'Abrams ».

L'objectif principal de cet essai est de vérifier que la classe de consistance du béton livré et prêt à être projeté est conforme aux prescriptions faites par le maître d'oeuvre.

Pour la projection par voie mouillée en flux dense, l'essai d'affaissement donne en plus une indication utile sur l'aptitude au pompage du béton livré sur le site.

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 matériel nécessaire à l'essai comporte un plateau de base plat et rigide (généralement en tôle) que l'on pose sur le sol de manière à ce qu'il soit bien horizontal. Le cône muni de poignées est fixé dessus.

Le béton prélevé est ensuite introduit dans le cône, compacté par piquage, en respectant les prescriptions de la norme NF EN 12350-2 (remplissage en 3 couches, chacune étant piquée par 25 coups d'une tige cylindrique de Ø 16 mm).

Pour le démoulage, le cône doit être remonté verticalement de manière régulière, en 5 à 10 secondes, sans imprimer au béton un mouvement latéral ou de torsion.

Enfin l'affaissement est mesuré au centimètre près. Pour cela on se sert de la toise graduée lorsque l'appareillage en est équipé, sinon on pose horizontalement une règle (un niveau de maçon par exemple) sur le moule de 30 cm de hauteur posé sur le plateau de base et on mesure la distance verticale entre la partie supérieure du cône de béton et la règle horizontale (voir les photos de la page suivante).

A titre indicatif on peut dire que pour un affaissement inférieur à 8 cm, la pompabilité est très incertaine.

Affaissement au cône d'Abrams (essai NF EN 12350-2)



Piquage tige Ø 16 dans le cône rempli de béton



Mesure de l'affaissement avec la toise
(Photos Eric Marsollat)



Mesure sans toise avec la tige de piquage posée sur le cône (photo Claude Resse)

2.4.1.1.2.4 Essai d'étalement au cône d'Abrams NF EN 12350-8 BAP

Cet essai, destiné aux bétons auto-plaçants (BAP) est homologué depuis novembre 2010. Il a été mentionné dans la partie A du fascicule contrôle car il peut servir d'essai sur béton frais. Il permet de vérifier la conformité du béton livré aux prescriptions du maître d'oeuvre et d'évaluer (avant d'être chargé dans la machine à projeter) son aptitude à être pompé.

Cet essai, est simple à réaliser sur chantier, il utilise le même cône d'Abrams que celui de l'essai 12350-2, seule la plaque de base est différente mais elle peut éventuellement être confectionnée sur le site (voir ci-dessous).

Matériel :

Il est basé sur celui de l'essai d'affaissement NF EN 12350-2 décrit précédemment modifié de la façon suivante :

- pour que l'étalement du béton ne soit pas gêné, la plaque de base est plus grande (900 x 900 mm)
- le centre de cette plaque de base doit être marqué avec une croix et par deux cercles (un de 210 mm de diamètre l'autre de 500 mm de diamètre) centrés sur la croix.
- pour que l'essai soit réalisable par une seule personne, le cône peut être lesté par un collier en acier pesant plus de 9 kg, ceinturant le cône mais, sans collier, il est possible qu'un aide empêche le cône de remonter pendant son chargement.
- Un chronomètre est également nécessaire

Principe de l'essai :

Le cône ayant été rempli de béton frais **en une seule fois, sans piquage**, on laisse reposer au maximum 30 secondes et on mesure le temps (t_{500}) passé à partir du début du soulèvement du cône jusqu'au premier contact du béton avec la circonférence de 500 mm de diamètre. On mesure ensuite le plus grand diamètre (dm) de l'étalement et celui (dr) à 90° de dm. L'étalement SF est la moyenne $(dm + dr) / 2$.

Test de faisabilité pour la projection par voie mouillée :

Il serait très utile d'expérimenter l'essai sur un ou plusieurs chantiers de projection par voie mouillée, d'abord pour confirmer qu'il est faisable avec les consistances des bétons permettant la projection par voie mouillée en flux dense, il sera alors possible de décider si l'essai d'étalement BAP doit être prescrit pour le béton projeté, compte tenu :

- de sa facilité d'utilisation sur chantier
- des informations supplémentaires qu'il peut apporter par rapport aux autres essais "normalisés non spécifiques au béton projetés" décrits dans le présent article 2.4 au titre des essais sur béton frais avant projection.

2.4.1.1.2.5 *Essai à la table à secousses NF EN 12350-5*

La table à secousse est plus encombrante que le cône d'Abrams et de ce fait moins appropriée au contrôle sur chantier que l'essai NF EN 12350-2 pour la mesure d'affaissement ou de l'essai NF EN 12350-8 pour la mesure d'étalement.

Les maîtres d'œuvres ne devraient donc plus prescrire son utilisation pour les contrôles.

2.4.1.1.2.6 *Essai d'écoulement à l'entonnoir en V NF EN 12350-9 (BAP)*

Cet essai, extrêmement simple à réaliser sur chantier est certainement, parmi les nouveaux essais normalisés BAP, le plus apte à estimer la pompabilité d'un **béton non fibré** devant être projeté par voie mouillée en flux dense.

Les fournisseurs et utilisateurs de bétons projetés comportant des fibres (métalliques ou synthétiques) pensent toutefois que l'entonnoir en V ne doit pas être utilisé pour les bétons projetés fibrés car les fibres peuvent gêner l'écoulement à la base du V.

Il est néanmoins possible qu'avec des microfibres synthétiques l'essai soit réalisable. Cela pourrait être vérifié sur chantier, en plus d'un essai d'étalement NF EN 12350-8 par exemple.

L'essai nécessite un entonnoir en forme de V, utilisant le même principe que le "cône de Marsh" servant à mesure la viscosité des coulis de ciment mais ayant une sortie de plus grande section permettant le passage d'un mélange à projeter fluide.

Pour réaliser cette expérimentation il suffira de se procurer un entonnoir en V conforme à la norme (actuellement sur le marché), un récipient de 12 litres pour contenir l'échantillon destiné à l'essai, un chronomètre et de respecter la procédure prescrite.

2.4.1.1.3 **Cas de la voie mouillée à flux dilué :**

2.4.1.1.3.1 *Mesure de la teneur en eau*

Contrairement à qui a été écrit pour la projection par voie mouillée à flux dense, une partie non négligeable de l'eau introduite au moment du gâchage peut être vaporisée pendant le passage du béton dans le tuyau de transport.

La mesure de la teneur en eau avant projection ne présentant aucune utilité et il n'existe pas de méthode normalisée pour effectuer cette mesure pour le béton projeté.

2.4.1.2 Essais sur béton frais après projection :

2.4.1.2.1 Cas de la voie sèche :

Avec cette méthode, le béton frais, formé sur son support, possède des caractéristiques rhéologiques (consistance) et physiques (masse volumique, compacité,...) qui sont dues au mode de mise en place.

Les essais normalisés de mesure de consistance, de compacité et de masse volumique, se réalisent tous après un prélèvement du béton frais, suivi d'une mise en place dans un récipient par damage ou vibration.

Ils ne peuvent donc être utilisés car, avec la voie sèche, les caractéristiques du béton, remanié par le prélèvement réalisé après projection soit sur l'ouvrage, soit dans un bac, seraient obligatoirement différentes de celles du béton mis en œuvre par projection.

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

2.4.1.2.2 Cas de la voie mouillée à flux dense

2.4.1.2.2.1 Généralités

Tous les essais normalisés, concernant les essais avant projection par voie mouillée en flux dense, qui ont été cités en 2.4.1.1.2., peuvent être réalisés, après projection, lorsqu'ils présentent une utilité et qu'ils ont été prescrits.

Seul le lieu du prélèvement, après projection, est différent puisqu'il doit être fait dans le béton frais venant d'être projeté, soit sur l'ouvrage soit dans un bac à échantillon.

La quantité de béton nécessaire à la réalisation de l'essai doit simplement être prélevée avec une pelle écope ou une truelle au lieu d'être recueillie par gravité à la sortie d'une bétonnière, d'une toupie ou de la machine à projeter.

2.4.1.2.2.2 *Mesure de la teneur en eau*

Comme cela a été écrit pour les essais sur béton frais avant projection, la perte d'eau due à une vaporisation entre la lance et la paroi réceptrice pouvant être considérée comme négligeable, la mesure de la teneur en eau après projection ne présente pas intérêt.

2.4.1.2.2.3 *Mesure de la masse volumique*

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 après projection sur l'ouvrage ou dans un bac, et compacté selon la norme, par vibration ou manuellement. Toutefois, comme cela a été écrit pour les essais sur béton frais avant projection un volume minimal de 2 dm³ pourrait être préconisé.

Pourtant cet essai de laboratoire, faisable sur chantier, n'est généralement pas prescrit pour évaluer la masse volumique d'un béton projeté.

2.4.1.2.3 Cas de la voie mouillée à flux dilué

Avec la projection par voie mouillée à flux dilué, qui diminue la teneur en eau et qui agit fortement sur la compacité et la teneur en air occlus, il peut être utile d'estimer les modifications apportées par la projection.

Les essais normalisés qui peuvent renseigner sur les modifications après projection sont :

- celui de la mesure d'affaissement pour comparer les consistances avant et après
- celui de la teneur en air occlus pour savoir si la quantité prescrite est respectée dans le béton en place vis à vis des résistances aux gels – dégels.

2.4.2. Essais sur béton durci

2.4.2.1 Généralités

Quelle que soit la méthode de projection (voie sèche ou voie mouillée) tous les essais normalisés s'appliquant aux bétons coulés peuvent être utilisés pour les bétons projetés, à partir du moment où il est possible de confectionner, par carottage ou sciage dans des échantillons réalisés par projection ou encore par prélèvement destructif dans l'ouvrage, des éprouvettes ayant les mêmes dimensions que celles prévues dans les normes des essais pour béton coulé (avec les mêmes tolérances).

Par exemple, la résistance à la flexion d'une éprouvette prismatique, peut être mesurée en utilisant l'un des 2 essais décrits dans la norme NF EN 12390-5.

D'autres essais, non spécifiques à la projection, peuvent être réalisés sur le béton projeté durci, par exemple :

2.4.2.2. Calcul de la masse volumique NF EN 12390-7

Ce calcul est fait en laboratoire d'après les dimensions réelles mesurées ou par mesure du déplacement d'eau comme indiqué dans la norme.

2.4.2.3 Profondeur de pénétration d'eau sous pression NF EN 12390-8

Cette mesure se fait également en laboratoire sur des carottes de béton projeté prélevées in situ ou en bac sur le chantier.

Pour cet essai, les dimensions de l'éprouvette (pour les cubes 150 mm de côté et pour les cylindres 150 mm de diamètre) entraînent la confection d'échantillons de dimensions inhabituelles en béton projeté.

Une adaptation du dispositif d'essai doit pouvoir être envisagée, par exemple pour des carottes de \varnothing 100 mm, en notant cette dérogation à la norme dans le rapport d'essai.

2.4.2.4 Détermination de l'indice de rebondissement NF EN 12504-2

Cet essai peut cette fois être entièrement réalisé sur chantier en suivant intégralement les prescriptions de la norme. Il fournit des informations sur les caractéristiques de surface dans la zone testée avec un scléromètre.

Il ne peut se substituer aux essais de résistance (NF EN 12390-3,5 et 6).

Matériel : Scléromètre dont il faut indiquer le type (par exemple : Schmidt type N)

Mode opératoire : Suivre les prescriptions de la norme et noter l'état de la surface testée (rugosité, humidité) et l'orientation de la frappe (horizontale, à 45°, en radier ou en voûte)

2.5 Essais non normalisés utilisés pour le béton projeté

2.5.1 Essais sur béton frais spécifiques au béton projeté

2.5.1.1 Mesure, sur béton frais, 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.

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, couche par couche, le compactage dû au 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.

Cette méthode est la plus précise

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).

La méthode d'essais peut donc largement s'inspirer de la norme NF 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 NF EN 12350-6 peuvent être appliquées y compris les données relatives à la fidélité de son tableau 1.

Plus simplement, la méthode c) décrite pour la voie sèche en 2.5.1.1.1 peut être utilisée.

2.5.1.2 Mesure de la consistance

2.5.1.2.1 Cas de la voie sèche :

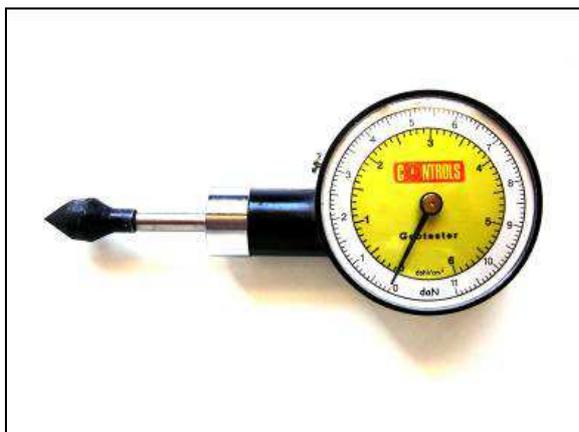
Les mesures de consistance ne peuvent se faire, avec cette technique, qu'après la projection et aucune méthode de compactage d'un échantillon prélevé ne permet de reconstituer, dans un cône d'Abrams par exemple, la consistance obtenue par cette projection.

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 \varnothing 2 à 4 mm) dans le béton qu'ils viennent de mettre en place.

Ce test éminemment qualitatif, mais néanmoins très utile, peut être avantageusement remplacé par une mesure de la résistance à l'enfoncement de la pointe d'un pénétromètre de poche utilisé par les géotechniciens.

La quantification de l'essai permet de le faire utiliser par des personnes n'ayant pas l'expérience d'un porte-lance qualifié et donc de le prescrire en tant qu'essai de contrôle.

Un pénétromètre mesurant des réactions allant de 0 à 11 daN et dont la pointe conique a un angle de 60° ou 90° pour une base de 8 mm de diamètre, peut être utilisé.



Pénétromètre de poche

A titre indicatif, le tableau ci-dessous donne un exemple des informations pouvant être obtenues avec 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.

Mesures faites dans les 3 minutes suivant la projection d'un béton non accéléré

Réaction en daN (moyenne d'au moins 3 mesures)	Consistance	Aptitude à la projection (pour un béton non accéléré)	Teneur en eau en % des matériaux secs
< 0,5	très fluide	inaptitude à la projection (sauf radier)	> 11
De 0,5 à 1	fluide	inaptitude sur mur en forte épaisseur	10 ± 0,5
De 1 à 2	très plastique	inaptitude en voûte et plafond	9,5 ± 0,5
De 2 à 4	plastique	aptitude dans toutes les directions	9 ± 0,5
De 4 à 6	ferme	bonne aptitude en voûte et plafond	8,5 ± 0,5
De 6 à 8	très ferme	très bonne aptitude en voûte et plafond	8 ± 0,5
De 8 à 10	dure	-d°- mais risque de zones non hydratées	7,5 ± 0,5
> 10	très dure	risque élevé de zones non hydratées	< 7

Dans le cas d'un béton accéléré la mesure doit être faite dans les 30 secondes suivant la projection.

Dans le cas d'un béton à prise et durcissement accélérés (type R.I.G décrit en 2.5.4.1.1.) la mesure doit être faite avec un pénétromètre différent (pointe plus fine et force de poussée admissible plus élevée)

Lorsque les mesures des réactions pénétrométriques sont échelonnées dans le temps, il devient possible d'enregistrer leur évolution et d'en déduire celle de la prise du béton qui a été projeté.

Pour un béton non accéléré les mesures se font, autant que possible à 3, 5, 10, 15, 30, 60 minutes et, pour un béton accéléré (sauf R.I.G.) à 1, 3, 5, 10, 15, 20, ...en s'arrêtant dès que la réaction de 10 daN est atteinte.

2.5.1.2 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 parfois utilisés en projection par flux dense, une mesure de viscosité à l'aide d'un cône "type Marsh" à très gros ajutage (20 à 50 mm), éventuellement prolongé par un coude a été utilisé avec succès.

L'entonnoir en V de la nouvelle norme NF EN 12350-9 est une variante de ce cône à très gros ajutage. Si ce nouvel essai normalisé donne satisfaction, il permettra d'officialiser, avec un matériel commun à tous, un essai très simple et efficace.

Un autre appareil simple permet de mesurer la résistance à la pénétration d'un tuyau en caoutchouc, dans un béton fluide à plastique (voir 2.5.2.1.2.).

Par rapport à l'essai normalisé d'affaissement décrit au § 2.1.2.2.1, les 2 mesures citées ci-dessus en exemple présentent l'avantage de renseigner sur l'aptitude au pompage, que l'on peut appeler la "pompabilité" du béton devant être introduit dans la pompe et poussé dans un tuyau. Elles sont par ailleurs simples et rapidement faites.

2.5.1.3 Mesure de la teneur en eau du béton en place

2.5.1.3.1 Cas de la voie sèche

On sait qu'avec cette méthode, la perte par rebondissement d'une partie des granulats (principalement les plus gros) provoque un enrichissement de la teneur en ciment.

Si on veut calculer cet enrichissement dû à la projection il est nécessaire de mesurer la teneur en eau du béton en place, ce qui ne peut se faire que sur le chantier.

Cette mesure est délicate car sitôt après avoir été projeté, le ciment commence à s'hydrater ce qui diminue la teneur en eau du béton. Il faut donc la mesurer le plus tôt et le plus rapidement possible.

La procédure utilisée depuis plus de 20 ans sur des chantiers en France, consiste à sécher l'échantillon en utilisant de l'alcool méthylique que l'on enflamme.

Il faut alors remuer constamment le mélange enflammé et recommencer l'opération jusqu'à poids constant.



**Séchage à l'alcool : échantillon enflammé remué constamment
durant son séchage, avec une cuillère à manche en bois**

Cette méthode, même si elle est commencée très tôt après la projection, prend plusieurs dizaines de minutes. L'eau capturée par le ciment pour son hydratation pendant ce temps n'est donc plus libre et la teneur en eau (différence entre les poids de l'échantillon avant et après séchage) est inférieure à celle qui serait mesurée en quelques secondes avec un humidimètre de laboratoire.

Il faut noter que cette méthode ne peut être utilisée pour les bétons projetés accélérés (a fortiori les RIG) ou ceux à base de ciment rapide.

Il existe maintenant des humidimètres paraissant utilisables sur chantier, Asquapro envisage de faire tester la faisabilité de leur emploi sur site pour les contrôles, ainsi que la précision et la fiabilité des mesures réalisées.

Si ces essais sont concluants, ils pourraient remplacer le séchage à l'alcool.

2.5.1.3.2 Cas de la voie mouillée

L'enrichissement en ciment étant négligeable en voie mouillée, son contrôle ne présente pas un grand intérêt, la mesure de la teneur en eau (nécessaire pour ce contrôle) est donc rarement prescrite.

Lorsqu'elle l'a été, sa mesure sur chantier s'est avérée plus difficile et moins fiable que pour la voie sèche, du fait de la plus grande quantité d'eau à enlever par le séchage à l'alcool.

La teneur en eau du béton fraîchement projeté par voie mouillée n'est de ce fait, à notre connaissance, plus jamais prescrite.

2.5.1.4 Tamisage sous l'eau d'un échantillon du béton en place

2.5.1.4.1 Cas de la voie sèche

Comme pour les deux essais précédents, le tamisage sous l'eau intéresse la projection par voie sèche d'un béton non accéléré.

Il permet de tracer la courbe granulairé du mélange après sa projection, en ajoutant à la courbe des refus sur un tamis de 0.080 mm, la teneur en ciment + fines du passant à ce même tamis.

Le décalage des ordonnées des courbes avant et après projection représente l'enrichissement de la teneur en ciment + fines.

D'après les courbes granulaires des granulats présents dans la composition du mélange à projeter, on connaît le pourcentage de fines passant au travers du tamis choisi pour l'essai, il est alors facile d'en déduire la teneur en ciment du béton venant d'être projeté.

Si la mesure de la teneur en eau a été faite, on peut calculer les rapports $E/(C+f)$ et E/C .

Il faut cependant noter qu'au moment de la rédaction des normes européennes sur les méthodes d'essais du béton projeté, aucune exigence relative au E/C n'a été formulée, il n'y a donc pas de norme prescrivant le calcul de ce rapport.

Néanmoins, la détermination de l'enrichissement en ciment peut être réclamée pour certains chantiers importants et très techniques.

Le tamisage sous l'eau est alors nécessaire.

Jusqu'à maintenant le tamisage se faisait sur un tamis à maille de 0,080 mm. Cette maille doit être conservée, les nouveaux tamis de 0,063 risquant d'empêcher le passage de certains grains de ciment.

Il serait même possible d'utiliser un tamis à mailles de 0,100, voir 0,125 à condition de déduire, pour le calcul du E/C, le pourcentage des éléments du sable et du gravillon passant par ces tamis.

Le tamisage sous l'eau est une opération délicate lorsqu'elle est réalisée sur chantier. Les ingénieurs et techniciens chargés du contrôle externe doivent donc y avoir été formés par des spécialistes lorsqu'elle est préconisée.

2.5.1.4.2 Cas de la voie mouillée

Comme cela a été écrit pour la mesure de la teneur en eau en 2.5.1.3.2, l'enrichissement en ciment est négligeable en voie mouillée.

Sa mesure n'est donc pas nécessaire

Le tamisage sous l'eau d'un échantillon du béton fraîchement projeté par voie mouillée, n'a, de ce fait, pas à être prescrit.

2.5.1.5 Analyse granulométrique du refus sur tamis de 0.080 mm

Cette analyse ne peut se faire que lorsque le tamisage sous l'eau décrit en 2.5.1.4 a été réalisé sur le chantier et que le refus a été récupéré sur le tamis de 0,080 mm.

Ce refus étant mouillé, une petite partie des éléments fins reste incrustée dans les mailles, il est donc nécessaire de récupérer le tamis et le refus qu'il contient, de le couvrir et d'enfermer le tout dans un sac étanche.

Au laboratoire, la première opération est donc de sécher à 105 ° à l'étuve, le tamis et son refus.

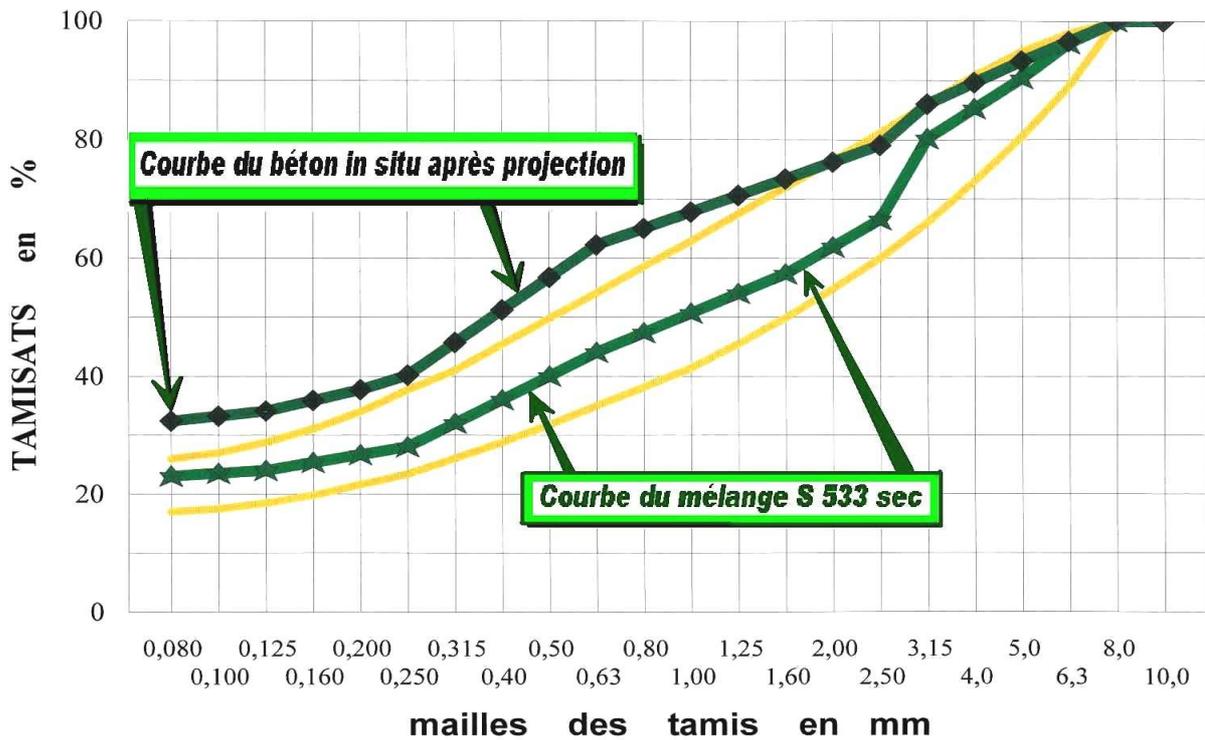
Ensuite, après une analyse granulométrique classique, le laboratoire trace la courbe représentative du refus et l'envoie au responsable du contrôle externe qui peut alors déterminer la courbe granulaire du béton in situ après projection (voir l'exemple du 13/05/97 ci-après).

Cette courbe est obtenue en ajoutant à la courbe du refus du laboratoire, le passant trouvé sur le chantier grâce au tamisage sous l'eau et à la mesure de la teneur en eau.

Sur l'exemple, l'enrichissement de la teneur en ciment dû à la projection est la différence entre les ordonnées à l'abscisse 0,080 (environ 10 %)

Il faut noter qu'en fonction de l'épaisseur du prélèvement, de sa position (mur, plafond ou bac échantillon) et du pourcentage de pertes, l'enrichissement peut atteindre 20 à 30 %.

ANALYSES GRANULOMETRIQUES DU BETON PROJETE LE 13 mars 1997



Exemple de courbes granulaires avant et après projection réalisées en 1997

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 il n'existe pas d'essais non normalisés et non spécifiques au béton projeté concernant la consistance du béton frais. Ceux spécifiques au béton projeté ont été décrits en 2.5.1.

Pour la voie mouillée à flux dilué, les problèmes de pompabilité ne se posant pas, 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, transporté dans le tuyau jusqu'à la lance et projeté.

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 un laboratoire (par exemple le LCPC pour le maniabilimètre).

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 applicables à la voie mouillée et réellement pratiqués sur les chantiers français sont décrits sommairement dans les paragraphes suivants.

Ils concernent uniquement les mesures de consistance et/ou de maniabilité.

2.5.2.1.1 Essai utilisant le 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 (en tenant compte de la surface des palettes) 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 risque d'être dépassée et qu'un litige pour non-conformité est possible.

Il faut cependant noter que le plasticimètre à palettes ne permet pas de mesurer un indice pour des mortiers ou des bétons de sable très fluides qui auraient des affaissements supérieurs à 20 cm au cône d'Abrams.

2.5.2.1.2 Pompabilimètres

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

Comme cela a été indiqué, pour les mesures de consistance avant projection en voie mouillée,

Un petit appareil permettant d'évaluer la pompabilité en quelques secondes à l'aide d'un simple pénétromètre de poche muni d'un embout en caoutchouc creux est encore plus pratique et plus simple à utiliser.

Il est appelé « pompabilimètre » dans ce guide, ce néologisme ayant le mérite de ne pas nécessiter de définition.

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



Pompabilimètre de poche



Évaluation de la pompabilité à l'aide d'un « pompabilimètre » de poche, avant de charger la pompe

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

2.5.3.1.1.1 Généralités

L'auscultation par sondage manuel au marteau, dont la réalisation est préconisée, souvent de manière systématique dans de nombreuses normes, a pour objectif de déceler et repérer les zones de béton projeté décollées de leur surface réceptrice.

Malheureusement pour cette préconisation très courante, il n'existe aucune méthode d'essai.

L'auscultation au marteau, qui est le plus souvent préconisée sur l'ensemble de la surface d'un ouvrage réparé ou renforcé, reste néanmoins le moyen le plus efficace pour déceler les plaques de béton projeté décollées et susceptibles de se détacher.

Elle permet également de déterminer des zones vraisemblablement pas décollées bien qu'émettant un son qualifié de "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.

À notre connaissance aucun texte normatif ne donne d'indications sur la manière de qualifier les sons, de réaliser le sondage, de relever les informations recueillies, de les enregistrer et de les exploiter.

C'est pourquoi le guide Asquapro présente ci-après, une première tentative visant à combler partiellement cette lacune.

Il se peut toutefois que des études aient été faites sur **le sondage au marteau**, nous demandons donc à **toute personne qui en aurait connaissance** de les signaler à Asquapro afin que le présent article du fascicule "contrôles – partie B" les prennent en compte.

Pour cela, contacter :

Catherine.larive@developpement-durable.gouv.fr

Présidente du comité technique

ou

clauderesse@club-internet.fr

Responsable du GT "Contrôles"

Les textes qui suivent ont été rédigés à partir d'hypothèses plausibles mais qui restent à vérifier et peut-être à modifier. Ils ne constituent donc qu'une première approche de futures études pour lesquelles des recherches sont à entreprendre.

Les comptes rendus concernant les sondages au marteau, rédigés par des responsables des contrôles externes ou extérieurs seraient très utiles pour alimenter ces études.

2.5.3.1.1.2 Qualification des sons

L'auscultation manuelle au marteau permet de distinguer les zones où la frappe émet un son bref apparemment sans résonance, qualifié généralement de son "plein" ou "mat" et d'autres zones où des sons, moins brefs et plus ou moins graves, qualifiés de "creux", indiquent qu'à l'emplacement de l'impact, la surface frappée est nettement entrée en vibration.

Il a été constaté, de 2002 à 2004, sur environ 6000 m² de revêtement d'intrados en béton projeté réalisé dans un tunnel, que les "sons creux" rendus par la frappe d'un marteau sur le chemisage projeté différaient par leur intensité, leur hauteur (fréquence) et leur timbre.

Ces différences proviennent de l'aire et de l'épaisseur de la zone de béton projeté mise en vibration et du volume de la caisse de résonance.

Cette caisse de résonance n'existe pas entre le béton projeté et son support (qui peut être constitué de béton, de maçonnerie, de bois, de tôle, etc.), si l'adhérence est parfaite.

Il est cependant possible de provoquer un son "creux" lorsque l'adhérence béton support est parfaite mais que c'est le support lui-même qui crée la caisse de résonance. Dans ce cas cela peut provenir par exemple d'une maçonnerie dont le hourdage est encore suffisamment compact pour qu'elle puisse vibrer si une caisse de résonance s'est formée à l'arrière (par exemple à cause d'un vide du terrain encaissant dans un tunnel).

Pour rédiger le compte rendu d'un sondage au marteau, la première difficulté provient du fait que les qualificatifs "plein" et "creux" ne devraient pas s'appliquer à des sons.

Pour le son dit "plein" il serait peut être plus judicieux de la qualifier de "mat" mais cela importe peu car ces sons d'impacts sont faciles à reconnaître et quelque soit leur appellation ils concernent généralement plus de 95 % de la surface auscultée.

Avec les zones émettant des sons "creux", le problème se complique car il ya plusieurs sortes de sons creux. Certains sont de fréquence élevée lorsque la surface mise en vibration est peu importante, d'autres sont d'autant plus graves (fréquences plus basses) que la surface mise en vibration est grande (plus d'un mètre carré parfois).

Pour les distinguer dans les comptes rendus on a, jusqu'à présent, en l'absence de mots plus judicieux qui restent à définir, utilisé "faible son creux" et "son creux".

Le centre d'étude des tunnels (CETU) qui procède à beaucoup de sondages au marteau pour ausculter les ouvrages dont il doit faire le diagnostic utilise "son creux" et "son caverneux" ce qui est plus parlant mais revient au même.

Avec ces deux catégories de sons creux, il a été possible de tracer sur les plans développés des surfaces auscultées, les contours de ces deux types de zones "résonnantes" qui ont été remplis par des couleurs légèrement différentes.

Il est vraisemblable que les études qui sont envisagées permettront de mieux différencier les sons et que trois ou quatre catégories pourront être définies.

2.5.3.1.1.3 *Procédure du sondage manuel au marteau*

Rappelons que l'auscultation manuelle au marteau doit permettre de distinguer des zones où la frappe émet un son qualifié de "plein" ou de "mat" et d'autres zones où des sons, moins brefs et plus ou moins graves, qualifiés de "creux", indiquent qu'à l'emplacement de l'impact, la surface frappée est entrée en vibration.

Pour réaliser le sondage manuel au marteau il faut que le béton projeté ait terminé sa prise, ce qui est généralement le cas au bout de 24 heures, en voie sèche, avec des mélanges, mêmes non accélérés lorsque la température est supérieure à 10 degrés.

En voie mouillée, par temps froid et lorsque un ciment lent est utilisé (CEM 3 C 42.5 par exemple) il faut attendre 48 heures ou plus même avec un béton accéléré.

Le sondage au marteau peut donc commencer, compte tenu des différences de temps de prise qui viennent d'être signalées, le lendemain pour la voie sèche (sauf par temps très froid) et le surlendemain, voire plus, pour la voie mouillée.

Compte tenu de la très grande importance de ce sondage pour détection des zones de mauvaise adhérence il est indispensable qu'il soit réalisé quotidiennement, il doit donc être réalisé au titre du **contrôle interne**, par les techniciens de l'entreprise qui ont été désignés comme responsables de ce contrôle. La procédure décrite ci-dessous doit donc avoir été proposée au maître d'œuvre dans le plan d'assurance qualité de l'entreprise.

Exemple de procédure :

Pour rechercher les zones sonnantes "creux", le responsable du contrôle interne doit frapper avec un marteau sur la totalité des parements projetés 24 h ou 48 h avant (ou plus si nécessaire, voir ci-dessus).

Pour ce sondage systématique les coups doivent être espacés tous les 20 à 40 cm sur toute la surface à ausculter.

Lorsqu'un son creux a été décelé, la zone doit être délimitée en frappant autour, environ tous les 10 cm.

La partie suspecte doit alors être marquée sur tout son pourtour directement sur l'ouvrage, à l'aide d'une bombe de peinture indélébile ou d'un marqueur, puis numérotée.

Des essais comparatifs ont été réalisés, avec le CETU, en utilisant deux marteaux différents. Il s'est avéré que l'utilisation d'un marteau de géologue à manche en acier n'est pas nécessaire (son poids de 850 grammes, est trop élevé pour l'opérateur lorsqu'il y a des grandes surfaces à sonder), un petit marteau pesant de 300 à 500 grammes avec un manche en bois bien fixé détecte les zones suspectes avec autant de précision.

Le sondage au marteau peut être répété plusieurs semaines ou mois après, tant que les zones repérées sur l'ouvrage sont visibles et accessibles.

Le marquage sur site est reporté sur le plan, ou une sur partie du plan développé de l'ouvrage (voir exemple page suivante)

Relevé des zones sonnantes creux

Le son creux est produit quand une zone plus ou moins étendue du parement est mise en vibration par le choc du marteau.

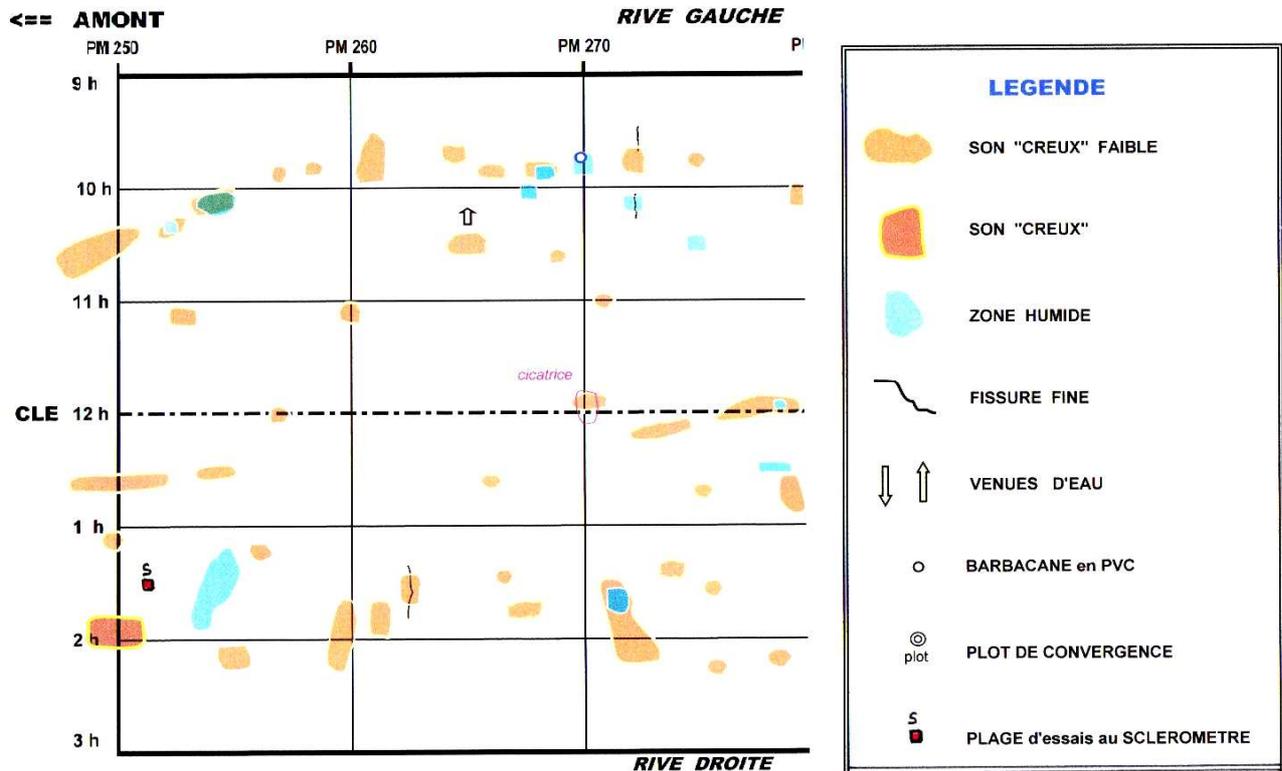
Du côté de la frappe, il est fonction du type de marteau, de l'énergie du choc, de la dureté du parement à l'emplacement de l'impact alors que, du côté de la surface frappée, il est fonction de l'aire et de l'épaisseur de la plaque mise en vibration ainsi que du volume de la caisse de résonance.

Sans appareils capables de mesurer (ou mieux d'enregistrer) ses caractéristiques, le son ne peut, "à l'oreille" qu'être estimé qualitativement en fonction de sa hauteur, de son intensité et de son timbre.

Cette estimation qualitative est néanmoins utile pour que l'examen du relevé des zones suspectes sur le plan développé de l'ouvrage, permette alors de mettre sous surveillance certaines de ces zones.

Une campagne de sondage faite 5 ans après permettra, même si les marquages sur l'ouvrage sont effacés, de mesurer l'évolution des surfaces suspectes.

Partie (environ 10 % soit 600 m²) d'un relevé réalisé en 2004 avec sa légende



Relevé des 2 types de sons "creux" sur 600 m² développés de tunnel

La zone sonnante vraiment creux est située au PM 250 à 2 heures et mesure 3 m² environ

2.5.3.1.2 Mesures d'indices sclérométriques

Ces mesures qui peuvent être faites 24 ou 48 heures après la projection du béton renseignent sur sa qualité à court terme.

L'objectif des mesures faites au titre du contrôle externe sur un chantier de béton projeté est de savoir, le plus rapidement possible, si la qualité du béton projeté est acceptable ou non sans attendre les résultats à 7 ou 28 jours des carottes de contrôle.

Il utilise un scléromètre identique à celui servant à la détermination de l'indice de rebondissement décrit dans la norme NF EN 12504-2 (voir article 2.4.2.4. du présent document).

Il a donc été décidé de demander aux responsables du contrôle externe un moins grand nombre d'impacts que celui préconisé dans la norme de façon à multiplier le nombre de zones testées.

2.5.3.1.2.1 *Mode opératoire :*

En dehors du nombre d'impacts par zone qui est différent, il faut suivre toutes les autres prescriptions de la norme NF EN 12504-2 et noter l'état de la surface testée (rugosité, humidité) et l'orientation de la frappe.

En fonction du choix de la zone testée, cette orientation du scléromètre peut être horizontale pour les impacts sur murs verticaux (ou sur piédroits pour les tunnels), verticale vers le bas sur plancher (ou dans l'axe du radier pour les tunnels), verticale vers le haut sous plafond (ou en clé de voûte pour les tunnels), à 45° vers le haut (rein de voûte en tunnel) ou encore 45° vers le bas.

Le contrôleur doit faire au moins 9 impacts par zone testée (3 rangées de trois par exemple) et calculer la valeur médiane des mesures relevées.

Les zones testées peuvent se situer :

- soit sur le parement d'une couche finale, tirée à la règle ou talochée, poncée ensuite après durcissement du béton sur une surface d'environ 400 cm²
- soit, lorsque le béton est laissé brut de projection, sur une zone sommairement dressée sur environ 400 cm² après la projection, que l'on ponce ensuite après durcissement du béton à la meuleuse ou à l'aide de la pierre abrasive du scléromètre.

Les valeurs médianes relevées sont inscrites sur chaque zone, ainsi que la date de projection, avec marqueur indélébile sur l'ouvrage.

Ces indications permettront de répéter les mesures une semaine ou un mois après afin de suivre l'évolution des résistances et éventuellement de les comparer à celles obtenues sur les carottes de contrôle.

2.5.3.1.2.2. *Repérage des zones de mesures :*

Le repérage se fait directement sur l'ouvrage, en entourant chaque zone testée d'un marquage indélébile puis en la numérotant et en y indiquant la date de la projection du béton.

Suivant l'emplacement de la zone repérée, l'inclinaison du scléromètre peut être déduite puisque la frappe doit se faire perpendiculairement à la paroi.

Ces mesures sont à faire 1 ou 2 jours après la projection, puis éventuellement à :

- 7 jours 14 jours et 28 jours (si c'est possible), sur les surfaces poncées et repérées.

Pour qu'il soit possible de permettre le renouvellement des mesures à plus long terme, il est indispensable de reporter les relevés sur des plans développés de l'ouvrage, dans le but de les faire aux bons endroits, même si les marquages ont disparu.

Matériel nécessaire :

- Scléromètre dont il faut indiquer le type (par exemple : Schmidt type N)
- Meuleuse ou pierre abrasive
- Marqueur indélébile

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, une résistance du béton suffisante pour assurer le soutènement dans le délai le plus court possible a toujours été recherchée.

Malheureusement, le prélèvement d'un échantillon par carottage, est pratiquement impossible tant que la résistance à la compression du béton n'a pas dépassé 1 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 celle mise au point en Autriche pour les travaux souterrains (reprise dans la norme NF EN 14488-2 décrite 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 h, 5 h et 24 h, par le sciage de cubes de 10 cm de côté, dans des dalles réalisées par projection.

Le sciage est remplacé par le carottage pour les éprouvettes destinées aux essais à plus long terme (à 7, 28 et éventuellement 90 jours).

Lorsque des essais de contrôle à 3 heures sont prescrits, il est indispensable de disposer sur le chantier d'un laboratoire mobile équipé d'une scie diamantée de grand diamètre pour découper les cubes de 10 x 10 x 10 cm et d'une presse pour les écraser.

Dans ce cas, il ne reste à l'entreprise qu'à confectionner les échantillons projetés dans des bacs de 50 x 50 x 15 ou de 60 x 60 x 15cm permettant de réaliser ensuite les cubes par sciage.

La projection doit être réalisée avec le personnel, le matériau et le matériel qui est prévu pour les travaux (dans le cas d'essais de convenance) ou par ceux en cours d'utilisation sur le chantier (dans le cas d'essais de contrôle).

Le porte-lance doit bien régler le mouillage à la lance pour obtenir la consistance recherchée avant de projeter dans la caisse.

Il doit ensuite commencer par les arêtes et faire tout son possible pour ne pas piéger des pertes dans la dalle.

La prescription de pose de la caisse à moins de 20 degrés du plan vertical comme pour la NF EN 14888-1 s'applique.

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	≥ 1,5 MPa	si t = 2°C
à 24 heures :	≥ 10 MPa		à 28 jours :	≥ 25 MPa

3 FREQUENCES DES ESSAIS ET MESURES

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

Dans ce tableau il est fait référence à des « catégories » qui concernent les niveaux d'inspection et qui doivent avoir été définies par le maître d'œuvre dans son appel d'offre.

Sur le chantier, les intervenants n'ont donc en principe qu'à respecter les fréquences prescrites dans le tableau 12 de la norme, en fonction de la catégorie d'inspection qui a été fixée dans le contrat.

Pour les responsables de l'entreprise chargés du contrôle interne et pour ceux du bureau d'étude ou du laboratoire chargé du contrôle externe, nous rappellerons ci-dessous quelques informations qui sont mieux détaillées dans l'article 3 de la partie A du fascicule contrôle et auquel il convient donc de se reporter

3.1 Catégories d'inspection

Il existe 3 catégories de niveau 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

Des exemples, ayant permis au MOE de déterminer la catégorie d'inspection pour l'ouvrage en fonction du niveau de risque au quel il est soumis, sont donnés dans l'annexe A (informative) de la norme NF EN 14487-1.

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.).

3.2 Tableau des fréquences minimales

Ces fréquences sont définies dans le tableau 12 de la norme NF EN 14487-1 en fonction de la catégorie d'inspection qui a été choisie par le MOE et du type d'ouvrage faisant l'objet des travaux.

Il convient donc de se reporter à ce tableau.