

***Formulation
des
Bétons Projetés***



FASCICULE FORMULATION

FASCICULE FORMULATION	2
1 INTRODUCTION	4
2 COMPOSITION DES BETONS PROJETES COURANTS	5
2.1 Généralités	5
2.2 Composition des bétons projetés par voie sèche	5
2.2.1 Problématique	5
2.2.2 Courbe granulaire des granulats	7
<i>Fuseau de référence</i>	7
<i>Dimension du plus gros granulat</i>	7
<i>Remarques sur le rapport Sable/Gravillons (S/G)</i>	8
2.2.3 Optimisation des éléments fins	8
2.2.4 Paramètres d'optimisation	9
2.2.5 Consistance	10
2.2.6 Additions	10
2.2.7 Adjuvants	10
2.2.8 Fibres	11
2.2.9 Eau	11
2.3 Composition des bétons projetés par voie mouillée	12
2.3.1 Problématique	12
2.3.2 Courbe granulaire	13
<i>Fuseau de référence</i>	13
<i>Dimension du plus gros granulat</i>	13
<i>Remarques sur le rapport S/G</i>	13
2.3.3 Les éléments fins	13
2.3.4 Paramètres d'optimisation	14
2.3.5 Consistance	14
2.3.6 Additions	14
2.3.7 Adjuvants	14
2.3.8 Fibres	15
2.3.9 Eau	15
3 LES CONSTITUANTS	16
3.1 Ciment	16
3.1.1 Travaux définitifs ou provisoires ?	16
3.1.2 Résistance visée à 28 jours ?	17
3.1.3 Exigences de résistance à court terme ?	17
3.1.4 Environnement et durabilité recherchée ?	18
3.1.5 Influence des conditions climatiques ?	19
3.1.6 Réactivité des granulats ?	19
3.1.7 Exigences esthétiques ?	19
3.1.8 Béton précontraint – Béton réfractaire	20
3.2 Granulats pour bétons et mortiers projetés	20
3.2.1. Gravillons	20

3.2.2. Sables	21
3.3 Fibres	21
3.3.1 Teneur en fibres	22
3.3.2 Précautions	22
3.4 Adjuvants et additions pour béton projeté	22
3.4.1 Définition, mise en œuvre et normalisation	22
3.4.2 Quel adjuvant employer ?	22
3.4.2.1. Cas des accélérateurs	23
3.4.2.2. Quelle famille de produit ?	23
3.4.2.3. Quel produit dans la famille ?	26
3.4.2.4. Ne pas oublier que	26
3.5 L'eau	26
4 BETONS ADAPTES A DES BESOINS SPECIFIQUES.....	27
4.1 Bétons mis en œuvre par temps chaud ou temps froid	27
4.1.1 Généralités	27
4.1.2 Les conséquences de la chaleur	27
4.1.2.1 Sur le béton frais (avant prise)	27
4.1.2.2 Sur le béton au jeune âge (après le début de prise)	27
4.1.3 Règles à retenir par temps chaud	29
4.1.4 Règles à retenir par temps froid	30
4.2 Bétons à prise et/ou durcissement rapide	30
4.2.1 Généralités	30
4.2.2 Les besoins	31
4.2.3 La classification	31
4.2.4 Comment les obtenir ?	31
4.2.5 Les accélérateurs	31
4.2.6 Les ciments rapides	32
4.2.7 Règles de formulation	33
4.2.7.1 règles générales	33
4.2.7.2 dosages	33
4.2.7.3 exigences	33
4.2.8 Rôle de la température	33
4.3 Bétons résistant au gel-dégel	34
4.4 Bétons à hautes performances	34
5 BETONS DE SABLE	34
6 REFERENCES CITEES DANS LE FASCICULE	35
7 ANNEXE	36
Fuseaux AFTES et AFNOR	37
Note Asquapro du 21 juin 2010	38
Utilité des fuseaux granulaires des mélanges à projeter	38
Modifications proposées par Asquapro	38
Prise en compte de la série de tamis des normes européennes	38
Modification de la forme des fuseaux	39
Fuseaux proposés par ASQUAPRO	40

1 INTRODUCTION

La meilleure formulation ne donnera toute sa mesure que si le béton est projeté par un opérateur qualifié. Pour s'en assurer, l'ASQUAPRO recommande d'exiger des porte-lances certifiés et renvoie pour cela à la rubrique formation-certification de son site Internet www.asquapro.com. Ce préliminaire est essentiel car la mise en œuvre a une grande influence sur les performances du béton projeté, bien plus encore que pour les bétons coulés. Nous ne reviendrons plus sur ce sujet dans la suite de ce document.

La technologie de mise en œuvre du béton par projection comporte quatre étapes, ayant chacune leurs exigences propres vis-à-vis du mélange :

1^{ère} étape : fabrication du mélange ; elle peut être réalisée en usine (pour les mélanges secs), en centrale BPE ou in-situ selon les exigences relatives à la cadence du chantier ou à la précision de la composition à réaliser.

2^{ème} étape : passage en machine ; le mélange doit être formulé de manière à s'écouler facilement dans le corps de la machine.

3^{ème} étape : transfert du mélange depuis la machine jusqu'à la lance ; l'important est alors que le mélange passe dans le conduit sans provoquer de bouchon tout en ayant des propriétés rhéologiques adaptées en sortie de lance.

4^{ème} étape : projection du mélange ; elle doit garantir d'une part la bonne tenue du béton sur le support avec les caractéristiques mécaniques demandées et d'autre part le minimum de pertes de matériaux.

Pour la voie mouillée, la formulation est conditionnée par la pompabilité. On peut largement s'inspirer des méthodes utilisées pour la formulation des bétons coulés pompés mais il est nécessaire d'intégrer les contraintes de tenue du béton frais sur le support. La formulation doit tenir compte de la longueur et du diamètre de la conduite.

Par contre, pour la voie sèche, la formulation est principalement fondée sur l'expérience.

Vous ne trouverez pas, dans ce document, de compositions « prêtes à l'emploi types » qui risqueraient d'induire en erreur un lecteur néophyte. En effet, la diversité des paramètres (liés aux matériels, aux matériaux, à la projection ou aux spécificités du chantier) et leur influence sur la formulation constituent un ensemble complexe qui doit être pris en compte, pour chaque cas, dans la recherche d'une formulation adaptée à la mise en œuvre et aux caractéristiques finales attendues.

Les spécifications sur les matériaux et la composition sont précisées dans le but d'être incorporées dans les spécifications et articles d'un C.C.T.P. pour travaux de béton projeté.

Ce fascicule part du principe que le choix de la méthode de projection (voie sèche ou voie mouillée) a déjà été fait (voir fascicule « mise en œuvre »). Les principes de composition pour les deux méthodes sont développés séparément (pour faciliter la lecture, on a fait apparaître en bleu le texte relatif à la voie mouillée). On aborde successivement la composition des bétons d'utilisation courante, les constituants, puis la composition des bétons projetés adaptés à des besoins spécifiques. Le cas des bétons de sable n'est pas traité ici ; on renvoie à la norme NF P 18-500 de juin 1995, issue du projet national SABLOCRETE.

2 COMPOSITION DES BETONS PROJETES COURANTS

2.1 Généralités

La composition des bétons projetés doit impérativement prendre en compte les modes de transfert et de mise en œuvre spécifiques à chaque méthode de projection :

Pour la voie sèche, le mélange, sec ou à faible teneur en eau, doit avoir une consistance pulvérulente pour permettre le passage en machine et le transfert par l'air comprimé jusqu'à la projection sur le support. Le compactage obtenu par la vitesse en sortie de lance permet la mise en place d'un béton à consistance ferme tenant sur le support, même sans adjuvant. Par contre, ce compactage génère des rebonds et des pertes, liés à la force d'impact des matériaux sur le support. La formation au contact du support d'une couche composée des éléments fins du mélange, dès le début de la projection, caractérise l'aptitude de la projection voie sèche à l'obtention d'une liaison de type cohésive. Il est rappelé que ce processus n'a pas d'équivalent en projection voie mouillée. Sachant que c'est principalement la quantité de ciment présente dans cette couche qui conditionne la force de la liaison, cela impose de respecter un dosage minimum de ciment lors de l'élaboration de la formule, sans toutefois être excédentaire.

Pour la voie mouillée, le mélange est formulé pour être pompable, en machine et jusqu'à l'extrémité de la conduite de transfert (voir fascicule « mise en œuvre »). La tenue du béton sur le support s'apparente à du « collage », le critère de pompabilité n'est donc pas suffisant et une contrainte de formulation est que le béton frais ne doit pas s'affaisser une fois en place. Pour cela, l'utilisation d'un adjuvant raidisseur en sortie de lance est quasi obligatoire. Toutefois cet adjuvant ne doit pas perturber la bonne mise en place du béton, en particulier le bon enrobage des armatures, ni affaiblir les caractéristiques mécaniques du béton.

L'ASQUAPRO propose d'interdire tout usage d'agents raidisseurs à base de silicates alcalins (les aluminates étant déjà interdits) car, outre leur effet néfaste sur les caractéristiques du béton, ils présentent des risques graves pour la santé et l'environnement. Cette interdiction doit être formulée explicitement dans les pièces écrites des marchés.

2.2 Composition des bétons projetés par voie sèche

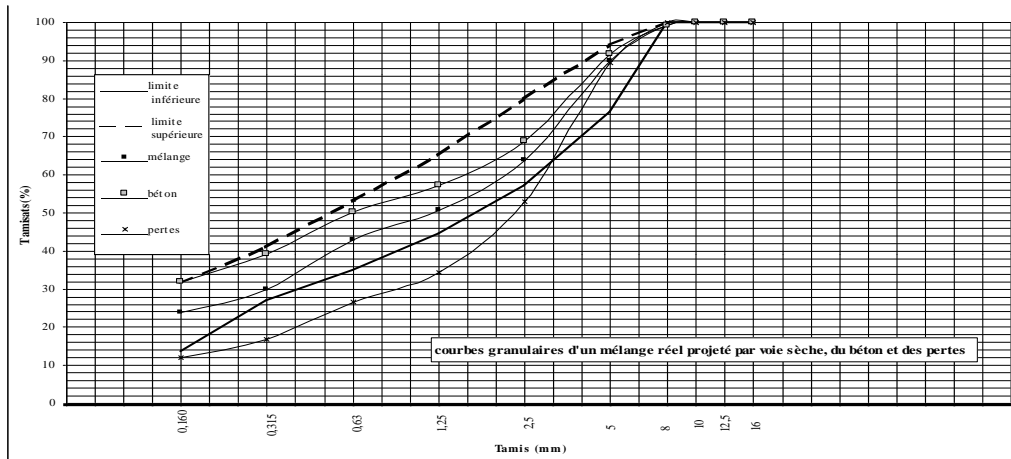
2.2.1 problématique

La composition d'un mélange destiné à être projeté par voie sèche se limite à une optimisation en vue de réduire les pertes lors de la projection. L'approche est simple car la composition accepte des écarts importants comme le montre une étude suisse réalisée par Piétro TEICHERT. Cette étude rassemble et superpose toutes les courbes granulaires validées par les experts en béton projeté, les porte-lances expérimentés ou certains fabricants de machine. On obtient alors un faisceau de largeur considérable (cf. graphique ci-dessous).

Cette multiplicité d'approche possible vient du fait que la méthode de projection par voie sèche autorégule la répartition granulaire du béton en place par le jeu des pertes, plus ou moins importantes.

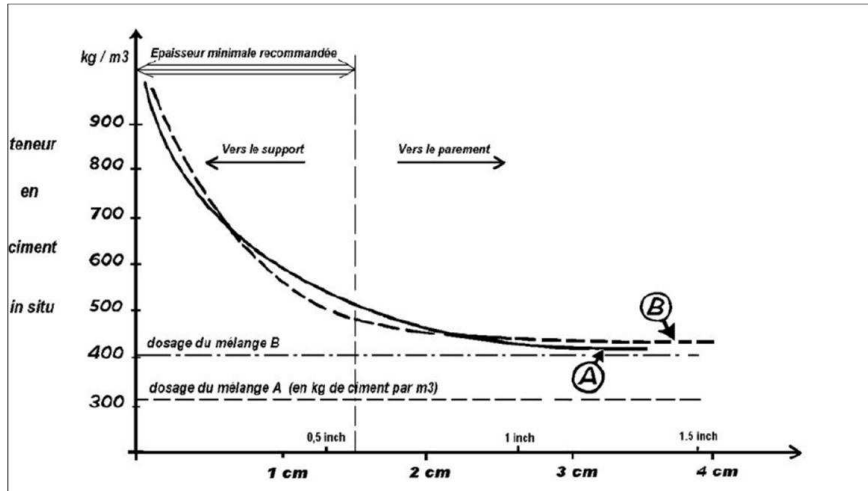
En considérant tous ces éléments, on comprend pourquoi les recommandations actuelles sont fondées sur des données empiriques et des constatations de chantier.

Les pertes générées lors de la projection font que la composition du béton effectivement mis en place est différente de celle du mélange initial. C'est à ce niveau que réside la particularité d'élaboration d'une composition de béton projeté par voie sèche.



Les méthodes classiques de formulation des bétons coulés n'incluent pas ces pertes et ne sont donc pas adaptées.

Les pertes ont pour conséquence un appauvrissement en gros granulats et donc un enrichissement en éléments fins.



Épaisseur de la couche projetée

Document de 1981 extrait du livre de C. Resse et M. Vénuat montrant l'enrichissement de la teneur en ciment en fonction de l'épaisseur de la couche projetée (teneur en ciment maximale contre la surface réceptrice)

La composition n'est pas le seul facteur influençant la quantité de pertes ; les autres paramètres sont nombreux et variables sur un même chantier. Ils sont liés :

- ✓ au mélange :
 - nature et forme des granulats
 - propreté et teneur en fillers des sables
- ✓ à la projection :
 - débit et vitesse de sortie du mélange (pression d'air)
 - pression de l'eau à la lance
- ✓ aux contraintes du chantier :
 - rigidité du support
 - épaisseur de la couche à réaliser
 - densité du ferrailage
- ✓ à l'habileté et l'expérience des opérateurs de projection :
 - distance lance-paroi
 - angle d'incidence du jet de projection par rapport au support
 - régularité du mouvement
 - dosage en eau.

Ces paramètres sont maîtrisables par la compétence des porte-lances et l'adaptation du matériel de projection. La part des pertes liées à la formulation peut donc être réduite de façon importante sachant qu'un minimum de pertes estimées entre 15 et 20% sur une paroi verticale est indispensable à l'obtention de la compacité du béton. Il est judicieux d'élaborer une composition optimisée. Le faible coût d'un mélange ne doit pas être le seul critère de choix. Un mélange non optimisé qui passe généralement en machine va produire une quantité de pertes importantes ce qui fait qu'au final le coût du béton sur le support sera très largement supérieur au coût du produit introduit en machine. **On ne fait pas d'économie en achetant de mauvais matériaux.**

2.2.2 courbe granulaire des granulats

C'est la première étape de la formulation. L'opération consiste à définir la proportion des différents granulats (sables et graviers) pour obtenir une courbe granulaire en accord avec les fuseaux qui figurent dans les recommandations de l'AFTES [TOS 117], dans la norme NF P 95-102 et depuis 2010, avec les fuseaux Asquapro, donnés en annexe au présent fascicule. Ces fuseaux ont été modifiés pour tenir compte du remplacement du tamis de 0,080 mm par celui de 0,063 mm dans les normes européennes et des retours d'expériences sur plus de 30 ans concernant la forme des fuseaux entre les abscisses 0,5 à 1,5 mm.

Fuseau de référence

Ces fuseaux fixent les limites hautes et basses qui résultent du savoir-faire et de l'expérience. Les caractéristiques granulaires des matériaux disponibles ne le permettent pas toujours, cependant il est recommandé d'étudier la formulation pour obtenir l'inscription de la courbe dans les limites du fuseau entre la coupe au tamis 0.315 et la coupe à : 6mm pour D max = 8 ; 8 mm pour D max = 10 mm ; 10 mm pour D max = 12,5 mm ; 12,5 pour D max = 16 mm et 16 mm pour D max = 20 mm. La courbe granulaire obtenue doit être la plus continue possible.

Dimension du plus gros granulat

Pour le béton projeté par voie sèche, il est courant d'utiliser un D max de 8-10 mm, voire exceptionnellement jusqu'à 20 mm grand maximum.

Le diamètre des tuyaux impose de respecter la règle empirique : $D \text{ max} \leq D \text{ tuyau} / 3 \times 1,2$ [Resse] pour éviter la formation de bouchon.

L'épaisseur à projeter et la densité d'armatures sont également à considérer dans le choix de D max.

Remarques sur le rapport Sable/Gravillons (S/G)

Le rapport pondéral S/G permet de caractériser la courbe granulatoire du mélange de granulats.

L'augmentation du rapport S/G implique :

- une diminution des résistances,
- un retrait plus important,
- des pertes moins élevées.

Le choix de la valeur du rapport S/G est un compromis entre les résistances et les pertes, lorsque la fissuration n'est pas préjudiciable. Mais ce rapport n'est pas suffisant et il est indispensable d'étudier la courbe granulatoire du mélange de granulats.

Exemple de S/G d'après les fuseaux granulatoires de la norme NF P 95-102 et les recommandations de l'AFTES.

Mélange granulatoire de diamètre maximum égal à	S*/G	
	Valeur inférieure du rapport	Valeur supérieure du rapport
8 mm	3,54	7,33
10 mm	3	6,6
12,5 mm	1,85	4,26
16 mm	1,22	2,22
20 mm	1	1,9

*attention, dans ce tableau, la limite sable/gravillon est fixée à 5 mm alors qu'elle est à 4 mm selon la norme NF EN 12 620.

En complément du S/G, la valeur d/D max avec $d = D \text{ max} / 2$ est pertinente. En effet l'expérience a montré qu'en la fixant sur la limite inférieure du fuseau granulatoire recommandé voire légèrement en dessous, on obtient très souvent un bon passage du produit pulvérulent dans la machine et un bon compactage tout en limitant les pertes. **Cela veut dire que la partie sable du mélange granulatoire doit aussi être de manière préférentielle le plus près possible de la limite basse du fuseau.**

2.2.3 optimisation des éléments fins

Sous la dénomination « éléments fins » on entend tous les éléments de taille strictement inférieure à 80 µm : le ciment, également les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et les fines du sable.

La composition à définir est celle du mélange avant passage en machine, l'ajout en ciment apporte un complément en éléments fins inférieurs à 80 µm.

Ces éléments fins ont un rôle primordial lors de la mise en œuvre (cf. fascicule « mise en œuvre » paragraphe 2.2.3).

Un fort pourcentage d'éléments fins réduit les pertes par rebonds, augmente les effets du retrait et réduit le module d'Young du béton. Il présente un risque de colmatage au niveau de la machine et des tuyaux.

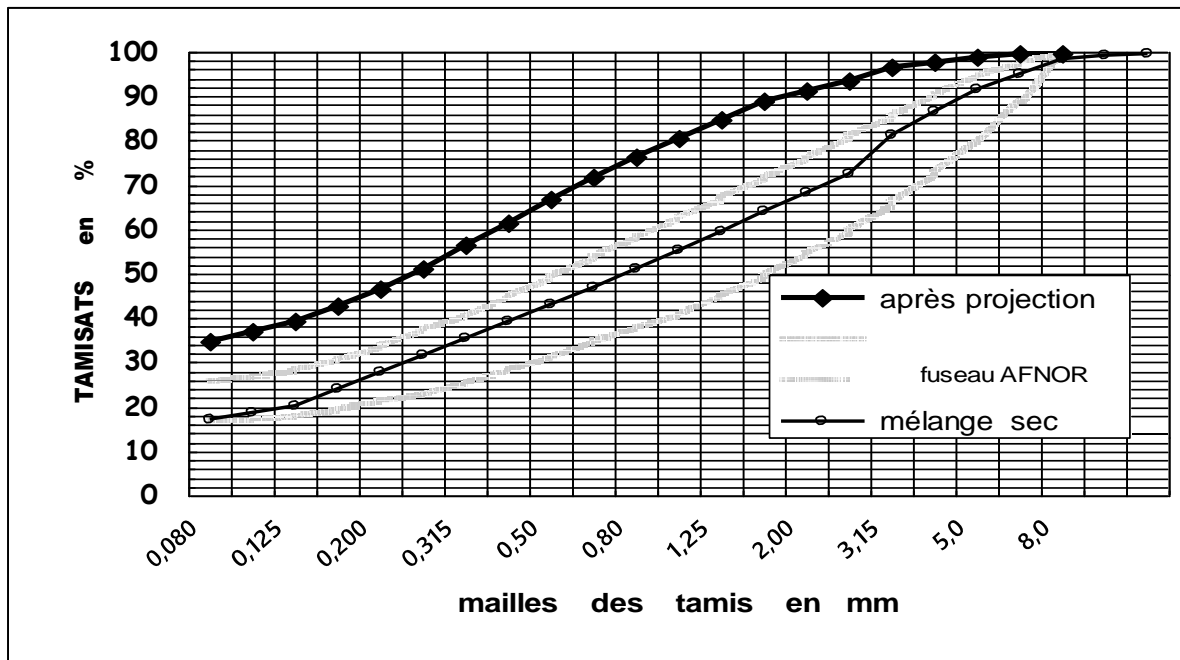
Les pertes tendent à réguler le dosage en fines : un mélange initialement sous-dosé en fines va s'enrichir en éléments fins lors de la projection grâce aux pertes en éléments plus grossiers. Par contre, si le mélange initial est déjà très riche en fines, les pertes seront limitées et il y aura peu

d'enrichissement en fines. Le ciment constituant la plus grosse partie des éléments fins, le béton projeté par voie sèche ne peut pas être sous-dosé en ciment.

La norme NF P 95-102 préconisait une teneur en éléments fins comprise entre 17 et 23%. Cette norme indiquait un dosage minimum en ciment de 280 kg/m³ et un pourcentage de passant à 80 µm supérieure ou égale à 17% en poids du mélange. Ces valeurs étaient à prendre avec précaution car 280 kg/m³ représentent seulement 13% pour la part du ciment. La norme européenne impose désormais un minimum de 300 kg/m³.

L'expérience montre que le pourcentage de passant à 63 µm doit être compris entre 21 et 23 % et que la part du ciment ne doit pas être inférieure à 17%. Cela correspond à un dosage minimum en ciment pouvant varier (en fonction des masses volumiques respectives du ciment et des granulats), entre 330 et 380 kg pour une quantité de matière sèche nécessaire à l'obtention d'un mètre cube de béton compacté, sans pertes. Cela correspond environ à 165 - 180 kg de ciment par tonne de mélange sec.

Graphique montrant le fuseau Afnor 0/8 mm (courbes grises), la courbe du mélange sec (prélevé dans un big bag) et la courbe du béton en place d'après l'analyse du béton frais



Analyses faites sur le chantier en 1997 sur le mélange sec et sur les prélèvements de béton frais réalisés au titre du contrôle externe concernant les travaux de réparation après l'incendie dans le tunnel sous la Manche (à cette époque le tamis de 0,080 était utilisé).

2.2.4 paramètres d'optimisation

A partir des paragraphes précédents et de l'expérience, on peut définir des paramètres de formulation pour l'optimisation de l'adhérence, la limitation du retrait et les caractéristiques en compression :

- Eléments fins < 63 µm : compris entre 21 à 22% avec un dosage ciment de 375 à 400 kg/m³ et 3 à 4% de fines
- Module de finesse de la partie sableuse 0,16-5mm du mélange : compris entre 3,2 et 3,5.
- Pour cette partie sableuse, la valeur de la masse entre deux tamis de la série ne doit pas excéder 20 à 25%. Cela revient à faire la courbe la plus continue possible.

Les formulations courantes sont effectuées à partir des ressources locales en granulats : les sables ne présentent pas toujours les caractéristiques optimisées ci-dessus. Généralement on fait au mieux pour

corriger la courbe des sables. Ces valeurs de modules de finesse ne sont pas une obligation mais elles conditionnent l'obtention des résistances exigées pour les bétons de classe ≥ 40 MPa.

Les spécifications retenues pour le choix des ciments et des critères des granulats sont indiquées au paragraphe 3 « Les constituants ».

2.2.5 consistance

Le mélange ainsi formulé composé de sable, de gravillons et de ciment et éventuellement d'additifs a une consistance¹ pulvérulente, ce qui nécessite de prendre en compte des critères de volume apparent et de densité du mélange.

Ces critères varient en fonction de la teneur en eau du mélange pulvérulent :

- pour un mélange déshydraté, cas des produits distribués en sacs, big-bags ou silos, la densité apparente est de l'ordre de 1750 kg/m^3 , soit un coefficient de foisonnement de 1,25.
- pour un mélange légèrement humidifié par la teneur en eau des granulats, la densité apparente est de l'ordre de 1450 kg/m^3 , soit un coefficient de foisonnement de 1,5.

Ces paramètres ne sont pas sans influence :

- les débits des machines à projeter sont donnés par rapport à la capacité volumique du dispositif mécanique de distribution du mélange, c'est un volume apparent qui est donné et qui passe en machine.
- Pour les mélanges livrés à partir d'une centrale de béton prêt à l'emploi, l'équivalent du poids de mélange malaxé pour un mètre cube de béton va occuper $1,5 \text{ m}^3$ dans la cuve du camion malaxeur, c'est un volume apparent qui est livré, si vous commandez 4 m^3 à la centrale, vous devez avoir environ 6 m^3 de mélange sur le chantier pour une teneur en eau de 3% à 4%.

2.2.6 Additions

On attire l'attention du formulateur sur les effets secondaires lors de la projection de l'ajout d'additions de type fumées de silice ou fillers (risque de défaut d'enrobage des armatures).

De plus, l'emploi de fumées de silice augmente le retrait du béton, conduisant à une fissuration superficielle (voir fascicule « mise en œuvre »).

On se reportera si besoin au document d'application nationale de la norme NF EN 206-1 qui précise toutes les normes relatives aux additions.

2.2.7 Adjuvants

Les adjuvants sont des composants qui s'emploient à un dosage $\leq 5 \%$ du poids du ciment. Au-delà de 5 % on parle d'additions **pour les bétons coulés**.

La norme NF EN 206-1 renvoie à l'EN 934-2.

Pour les bétons projetés la norme NF EN 934-5 s'applique.

En règle générale, les adjuvants sont peu employés en voie sèche. Ils peuvent toutefois être utilisés pour des applications particulières dans lesquelles on souhaite augmenter l'épaisseur des couches projetées en une passe (projection en plafond ou en voûte). Voir le paragraphe 3.4. « Constituants ».

¹ : Le terme consistance n'est pas pris ici au sens du paragraphe 4.2.1 de la norme NF EN 206-1, dans lequel il est précisé qu'il n'y a pas de classe d'affaissement correspondant aux bétons à consistance terre humide destiné à être compacté par un procédé particulier (ici la projection).

2.2.8 fibres

La composition d'un mélange avec introduction de fibres doit tenir compte des pertes en fibres lors de la projection ce qui conduit à un surdosage qui est fonction du type de fibres. Ce type de composition ne peut être validé que par une épreuve d'étude.

Voir le paragraphe 3.4. « Constituants » et l'annexe A de la norme NF EN 14 487-1.

2.2.9 Eau

L'eau étant rajoutée à la lance de projection, elle n'est prise en compte qu'en fonction du mode de fabrication du mélange :

- Mélange industriel sec prêt à l'emploi, l'eau n'est pas prise en compte lors de la formulation, les granulats ayant une teneur en eau inférieure à 0.5%,
- Mélange B.P.E. ou centrale sur chantier, la teneur en eau est limitée à 5% des granulats (pourcentage en poids).

L'eau ajoutée à la lance, doit avoir les mêmes qualités que l'eau de gâchage d'un béton coulé.

Elle doit donc être conforme à la norme NF EN 1008 « eau de gâchage pour béton »

2.3 Composition des bétons projetés par voie mouillée

Le texte est en bleu pour éviter les confusions avec la voie sèche.

2.3.1 problématique

La projection de béton par voie mouillée doit concilier l'antinomie qui caractérise cette technique : le mélange plastique pompable doit être quasi instantanément raidi pour pouvoir tenir sur le support. Généralement les mélanges sont formulés à partir des ressources locales en granulats, tout le travail de formulation consiste à optimiser la courbe de la composition granulaire et à faire un emploi judicieux d'adjuvants.

La formulation d'un mélange à projeter par voie mouillée doit tenir compte de plusieurs critères :

- pompabilité du mélange dans la machine, dans le conduit de transfert et dans la lance de projection (malgré le faible diamètre et les interactions de l'air et de l'agent raidisseur),
- projectabilité du mélange en limitant les pertes,
- collage du béton sur le support,
- caractéristiques attendues compte tenu de l'utilisation d'un raidisseur ou d'un accélérateur qui peut induire des pertes de résistances mécaniques à moyen et long terme, voire dans les pires cas, réduire le béton en poussière au bout d'une vingtaine d'années !

Le point le plus problématique reste la pompabilité du mélange. La moindre difficulté de pompage peut générer des troubles importants dans la cadence des travaux ; les bouchons, étant pénibles à évacuer, nécessitent le plus souvent beaucoup de manutention et peuvent entraîner des conséquences sur la qualité en place. **De ce fait, la composition doit être soigneusement étudiée et sa reproductibilité parfaitement assurée.**

Les méthodes classiques de formulation des bétons coulés sont adaptées pour les bétons projetés par voie mouillée. Il faut néanmoins les compléter pour tenir compte de la tenue du béton (collage) sur le support qui nécessite l'emploi quasi obligatoire d'un adjuvant raidisseur ou activateur de prise.

Les pertes sont aussi présentes (de l'ordre de 10 à 15%) mais ne modifient pas la composition finale du béton.

Les paramètres influençant la pompabilité sont nombreux et variables sur un même chantier. Ils sont liés :

-au mélange :

composition, teneur en fines
nature et forme des granulats.
adjuvantation
type et quantité de fibres utilisées,

-au transport :

distance
diamètre de conduite
tracé de la conduite

-à l'environnement du chantier et à la température ambiante

Les paramètres influençant la tenue sur le support sont nombreux et variables sur un même chantier. Ils sont liés :

- à la projection :
 - débit et vitesse de sortie du mélange (pression d'air),
 - choix du type de raidisseur et mode d'introduction
- aux contraintes du chantier :
 - rigidité du support,
 - épaisseur de la couche à réaliser,
 - densité du ferrailage,
- à l'habileté et l'expérience des ouvriers porte-lance et/ou pilote de robot :
 - distance lance-paroi,
 - angle d'incidence du jet de projection par rapport au support,
 - régularité du mouvement.

Ces paramètres sont maîtrisables par une composition élaborée nécessitant l'emploi d'adjuvants et d'additions, par la compétence des opérateurs et l'adaptation du matériel de projection.

Un emploi non maîtrisé des adjuvants nécessaires au raidissement a une incidence directe sur la qualité finale du béton en terme de résistance et de durabilité.

2.3.2 courbe granulaire

L'approche est comparable à celle décrite pour la voie sèche.

Fuseau de référence

L'inscription de la courbe granulaire obtenue se fait comme indiquée pour la voie sèche.

Dimension du plus gros granulat

Pour le béton projeté par voie mouillée il est courant d'utiliser D max de 8 à 12mm et 16 mm étant considéré comme un maximum. Le choix de D max. dépend du type de machine utilisé et des possibilités de ressources locales. Il est à considérer également dans le choix de D max l'épaisseur à projeter et la densité d'armature.

Remarques sur le rapport S/G

Ce rapport n'est pas suffisant pour caractériser une composition voie mouillée. Il est indispensable d'étudier la courbe granulaire du mélange de granulats en tenant compte des critères de pompabilité et l'obtention d'une compacité optimum. La détermination du rapport S/G peut se faire par la méthode « Baron Lesage » mais en intervenant judicieusement sur le dosage des éléments fins.

2.3.3 Les éléments fins

La composition à définir est celle du mélange avant passage en machine, l'ajout en ciment apporte un complément en éléments fins inférieurs à 63 µm.

Sous la dénomination « éléments fins » on entend tous les éléments de taille inférieure à 63 µm : le ciment, également les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et les fines du sable.

Ces éléments fins ont un rôle primordial lors de la mise en œuvre (cf fascicule « mise en œuvre » paragraphe 223).

L'expérience pour un béton courant montre que le dosage minimum en ciment dans le mélange sec ne doit pas être inférieur à 400 kg/m³. Un dosage inférieur à 400kg/m³ peut être utilisé cela nécessite une formulation plus élaborée au niveau des ajouts en éléments fins.

2.3.4 paramètres d'optimisation

A partir des paragraphes précédents et de l'expérience, on peut définir des paramètres d'optimisation :

- Dosage minimum en ciment de 400 kg/m³.
- Module de finesse de la partie sableuse 0,16-5 mm du mélange inférieur à 2,5 mm,
- Pour cette partie sableuse, la valeur de la masse entre deux tamis de la série ne doit pas excéder 20 à 25%. Cela revient à faire la courbe la plus continue possible.

Chronologie de la démarche pour obtenir la composition :

- Etude du rapport S/G pour obtenir la compacité optimum,
- Définir le dosage en éléments fins (ciment, filler, fines du sable) pour la pompabilité.

2.3.5 consistance

La pompabilité conduit à choisir une consistance correspondant à une classe d'affaissement de S3 à S4. Les consistances de classe d'affaissement S1 et S2 sont d'un emploi très délicat. Celle-ci doit aussi être adaptée au type de pompe et au diamètre de sortie. Pour être pompable le béton doit avoir un aspect gras et ne doit pas ressuer ni avoir de ségrégation. Dans tous les cas on aura recours à des plastifiants ou superplastifiants voire des retardateurs ou inhibiteurs de prise (stabilisateurs) et des entraîneurs d'air.

En sortie de lance il convient de corriger la plasticité devenue excessive par l'introduction d'un raidisseur-accélérateur de prise.

2.3.6 Additions

Contrairement à la voie sèche l'emploi d'additions est utile pour optimiser le squelette granulaire.

On se reportera au document d'application nationale de la norme NF EN 206-1 qui précise toutes les normes relatives aux additions.

2.3.7 Adjuvants

L'emploi des adjuvants est pratiquement toujours nécessaire à l'élaboration d'une formulation voie mouillée.

Les adjuvants sont des composants qui s'emploient à un dosage ≤ 5 % du poids du ciment. Au-delà de 5 % on parle d'additions. Dans ce cas au titre de la norme NF EN 206-1 ils sont classés sous la rubrique « Autres additions » qui peuvent être incorporés en accord avec l'utilisateur dans le béton pour lui conférer des propriétés particulières. Ces autres additions doivent faire l'objet d'études justificatives. Pour le béton projeté, la norme qui le concerne (EN 934-5) autorise un dosage > 5 %.

Voir le tableau d'emploi au chapitre « constituant 3.4 » au chapitre suivant.

2.3.8 fibres

Les fibres influent sur la pompabilité par augmentation de la cohésion du mélange. Celle-ci doit être corrigée par une adaptation de la quantité de la « pâte » d'éléments fins et l'introduction d'adjuvants pour « casser » la cohésion.

2.3.9 Eau

Comme pour la voie sèche, l'eau doit avoir les mêmes qualités que l'eau de gâchage d'un béton coulé. Elle doit donc être conforme à la norme NF EN 1008 « eau de gâchage pour béton »

L'eau efficace comprend :

- L'eau de gâchage introduite au malaxage
- Une partie de l'eau apportée par les granulats
- L'eau contenue dans les adjuvants liquides introduits au malaxage
- *Ne pas oublier l'eau apportée par l'introduction des adjuvants liquides à la lance.*

L'eau va conditionner la résistance par le rapport E/C. La démarche est comparable à celle des bétons coulés.

Il est nécessaire de régler la consistance par l'emploi des adjuvants plastifiants ou superplastifiants plutôt qu'avec un ajout d'eau.

3 LES CONSTITUANTS

3.1 Ciment

Il est précisé que l'emploi des ciments est codifié dans la norme NF EN 197-1. L'attention est attirée sur le fait que cette codification nécessite de prendre en compte les compléments d'annotation conservés pour l'emploi sur le territoire français, annotation « prise mer » par exemple, en cas d'emploi dans d'autres pays de la communauté européenne il convient de vérifier que la composition du ciment est compatible avec la classe d'environnement de l'ouvrage, toujours pour notre exemple de travaux à la mer le pourcentage de clinker et la teneur en C3A.

Pour choisir le ciment le mieux adapté à votre application, il vous faut d'abord répondre aux questions suivantes :

- 1) S'agit-il de travaux définitifs ou provisoires ? Faudra-t-il une phase provisoire (cas particuliers de venues d'eau, zones congelées, autres contraintes liées au support...)?
- 2) Quelle est la résistance visée à 28 jours ?
- 3) Y a-t-il des exigences de résistance à court terme ? si oui, lesquelles ?
- 4) Quelle est la durabilité recherchée ? Dans quel environnement ?
- 5) A quelle saison les travaux seront-ils effectués ?
- 6) Les granulats sont-ils potentiellement réactifs vis-à-vis de l'alcali-réaction ?
- 7) Quelles sont les exigences esthétiques (couleur, autres) ?
- 8) S'agit-il d'une application particulière ? (béton précontraint ? béton réfractaire ?)

Remarque : la méthode de projection (voie mouillée ou voie sèche) n'influence pas directement le choix du type de ciment. A noter toutefois que la classe 32,5 suffit rarement pour les bétons projetés.

Voici comment vos réponses à ces questions vont vous guider vers le type de ciment adapté :

3.1.1 Travaux définitifs ou provisoires ?

S'il s'agit de travaux définitifs, les ciments normalisés sont obligatoires pour les marchés publics car ils présentent les garanties maximales de durabilité.

Pour les travaux ou les phases provisoires, on cherche également à utiliser en priorité des ciments normalisés qui, combinés aux adjuvants, couvrent une très large gamme d'utilisation. Seules des contraintes bien particulières (tels que les supports très humides ou congelés, travaux en zone de marnage) conduisent à l'emploi de ciments non normalisés.

Les ciments non normalisés sont :

- des ciments spéciaux qui répondent à des besoins spécifiques lorsque les ciments normalisés, même adjuvantés, n'ont pas les performances exigées : ils sont généralement utilisés pour des travaux provisoires avant une phase définitive ; ce sont des ciments élaborés qui font l'objet de plan d'assurance qualité, d'Agréments Techniques Européens et de marquage CE.
- mais parfois aussi des ciments mal référencés (provenance inconnue, caractéristiques imprécises...) qui ne présentent aucune garantie de qualité et, de ce fait, ne sont jamais utilisés en ouvrages d'art.

3.1.2 Résistance visée à 28 jours ?

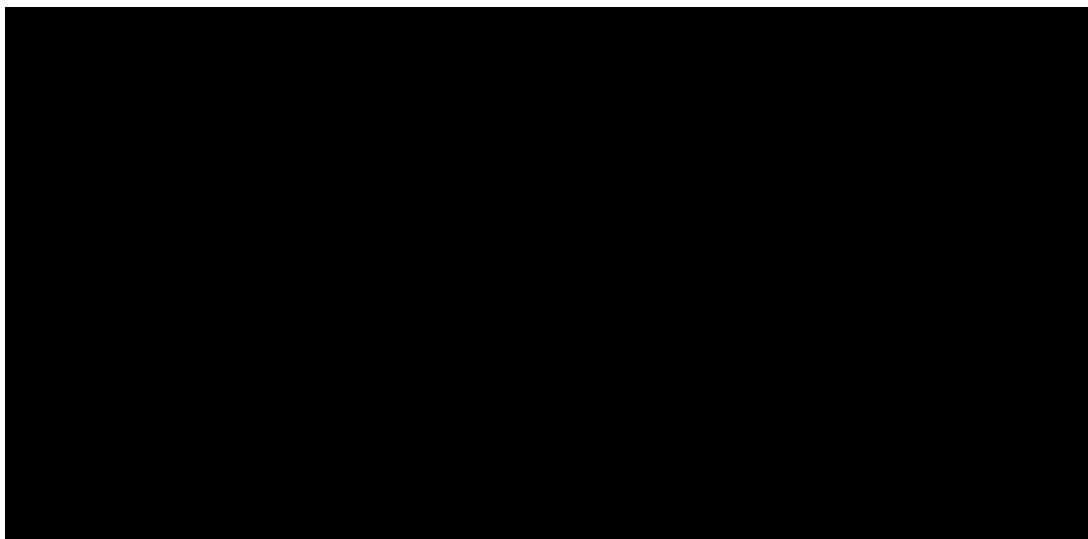
La réponse à cette question définit en grande partie la classe de ciment à utiliser.

Pour la voie mouillée à partir de la classe de résistance C35/45 et pour la voie sèche à partir de la classe C40/50, on utilise le plus souvent un ciment de classe 52,5. Pour des résistances inférieures, on utilise un ciment de classe 42,5.

Dans une certaine mesure, on peut compenser une classe de ciment inférieure par un dosage supérieur. Toutefois, cette approche ne permet pas toujours d'obtenir une teneur en fines compatible avec la « projectabilité » du mélange par voie sèche (fourchette de la norme NF P 95-102 entre 17 et 23% d'éléments inférieurs à 80 µm – cf § formulation)

3.1.3 Exigences de résistance à court terme ?

Les exigences de résistance à « court terme » – jusqu'à 24 heures – sont répertoriées dans la norme NF EN 14487-1 (tableau 8) en trois classes : J1, J2 et J3 (voir graphique ci-dessous). Les courbes A, B, C déterminent la limite entre ces différentes classes. J1 est le domaine compris entre les courbes A et B. J2 est compris entre B et C. J3 est au-dessus de la courbe C.



On définit tout d'abord la classe de résistance à court terme exigée.

Une composition donnée permet d'obtenir des classes de résistance à court terme différentes en fonction de la température du béton, paramètre-clé de la cinétique de durcissement aux jeunes âges.

Les tableaux ci-dessous montrent, en voie sèche puis en voie mouillée, comment choisir un type de ciment permettant d'atteindre le niveau souhaité de résistance à court terme :

Voie sèche

Température béton frais	J1	J2	J3
5 à 15°C	CEM I 52,5 et accélérateur dosé à moins de 5% ou Ciment rapide de type ciment Portland sans gypse ²	CEM I 52,5 et accélérateur dosé à plus de 5% ³ ou Ciments spéciaux rapides	Ciments spéciaux rapides ou CEM I 52,5 et accélérateur dosé à plus de 5% au-dessus de 10°C
15 à 25°C	CEM I 52,5	CEM I 52,5 et accélérateur dosé à moins de 5% ou Ciment rapide de type ciment Portland sans gypse	CEM I 52,5 et accélérateur dosé à plus de 5% ou Ciments spéciaux rapides
25°C à 35°C	CEM I 52,5	CEM I 52,5	CEM I 52,5 et accélérateur dosé à moins de 5%

Remarque : les ciments CEM I 52,5 R facilitent l'obtention de résistances élevées au jeune âge mais augmentent la fissuration due au retrait.

Voie mouillée

Température béton frais	J1	J2	J3
5 à 15°C	béton de CEM I 52.5 R et d'un accélérateur dosé à plus de 5%	béton de CEM I 52.5 R et d'un accélérateur dosé à plus de 5%	performances impossibles à obtenir actuellement
15 à 25°C	béton à base de CEM I 52.5R et d'un accélérateur dosé à moins de 5%	béton à base de CEM I 52.5R et d'un accélérateur dosé à plus de 5%	performances impossibles à obtenir actuellement
25 à 35°C	béton à base de CEM I 52.5 R et d'un accélérateur dosé à moins de 5%	béton à base de CEM I 52.5 R et d'un accélérateur dosé à plus de 5%	béton à base de CEM I 52.5 R et d'un accélérateur dosé à plus de 5%

3.1.4 Environnement et durabilité recherchée ?

Se référer aux classes d'environnement de la norme NF EN 206-1

Mise en garde : on assiste actuellement à une évolution de la formulation des exigences : on n'impose plus (ou de moins en moins) d'exigence de moyens mais, de plus en plus, des exigences de performance. C'est une évolution logique qu'il est utile de poursuivre. Il faut néanmoins admettre que nous en sommes seulement au début de cette démarche et qu'il est aujourd'hui impossible de garantir une durabilité de 120 ans, comme cela est parfois exigé... La première production de ciment ne date que de 1842 et le début de l'essor du ciment industriel ne remonte qu'aux années 1880 !

² Fréquemment utilisé en Allemagne

³ Attention à la durabilité si trop fort dosage en accélérateur

Dans ce paragraphe sur le choix du ciment, insistons sur le fait que la durabilité ne dépend pas du seul ciment mais de la formulation (interactions entre tous les composants) et de la mise en œuvre du béton. Le choix d'un ciment adapté ne peut en aucun cas garantir la durabilité de l'ensemble du matériau béton, toutefois la notion d'un dosage minimal reste toujours un critère de durabilité.

Dans l'esprit de la démarche « performancielle » ci-dessus, des essais de vieillissement accéléré sur la formule de béton choisie sont nécessaires. Les difficultés résident non seulement dans la représentativité des essais mais surtout dans le passage du « temps accéléré » au « temps réel ». Ces connaissances vont s'affiner avec des retours d'expérience de plus en plus nombreux. Il ne reste qu'à être patient !

3.1.5 Influence des conditions climatiques ?

Se reporter au paragraphe « Adaptation à des besoins spécifiques – temps chaud/temps froid ». du présent document.

En cas d'exigences de résistance au jeune âge, voir les tableaux du 3.1.3 qui prennent en compte l'effet de la température.

3.1.6 Réactivité des granulats ?

Si l'utilisation de granulats potentiellement réactifs vis-à-vis de l'alcali réaction est envisagée, le choix d'un ciment à faible teneur en alcalins peut être nécessaire pour satisfaire le bilan des alcalins totaux [Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali réaction, 1994]. Toutefois ces recommandations sont à prendre avec prudence. Pour la voie mouillée elles sont applicables car le béton après projection garde sa composition initiale de fabrication. Pour la voie sèche, la couche au contact du support est fortement enrichie en ciment et ne contient pas de granulats et ne devrait donc pas présenter de phénomène de réaction alcali-silice, pour le reste on peut envisager de prendre en compte un enrichissement moyen en ciment (pouvant atteindre jusqu'à 20%) pour calculer le bilan des alcalins. Pour tout ce qui concerne les essais accélérés, il est nécessaire de scier les éprouvettes dans des caisses et faire très attention à la fiabilité du positionnement des plots de mesure.

3.1.7 Exigences esthétiques ?

Pour obtenir un parement avec un objectif d'aspect uniforme (couleur ou texture), il est nécessaire de réaliser une couche finale (d'épaisseur 1 à 2 cm) dont la fonction est uniquement esthétique. Cette couche finale relève de la technique des enduits. Il est possible pour des teintes claires de réaliser cette couche avec un béton projeté à base de ciment blanc ou clair non retouché.

Il est plus difficile de garantir l'obtention d'une couleur donnée en béton projeté qu'en béton coulé. C'est encore plus délicat en voie sèche qu'en voie mouillée. On peut alors être amené à distinguer le rôle structurel du béton, sans exigence de couleur et à utiliser un enduit pour répondre aux besoins d'ordre esthétique.

De manière générale, le ciment, comme toutes les fines, a une forte incidence sur l'esthétique finale du béton. Pour le béton projeté, son influence concerne essentiellement la couleur.

Pour obtenir un béton de teinte claire, il faut utiliser un ciment clair. Un filler clair ajouté à un ciment sombre ne suffit pas.

Les ciments blancs sont très rarement utilisés pour les bétons projetés. Ils sont néanmoins indispensables pour réparer des constructions en béton blanc (par exemple : le ministère des finances à Bercy, la tour hertzienne de la Sainte Baume) ou pour réaliser des ouvrages en béton de teinte très claire (caisse d'épargne de Bordeaux-Mériadec) ou des intrados de tunnel (e.g. tunnel de Sisteron).

L'ajout de colorants est assez fréquent (talus, falaises). Il ne modifie pas le choix du ciment, le colorant étant en fait un filler inactif ordinaire. En cas de choix de teintes foncées, il est pratiquement impossible de garantir l'uniformité de l'aspect final.

Les défauts esthétiques (efflorescences, ...) ne proviennent pas exclusivement du ciment mais de l'ensemble de la formule de béton et des variations de l'humidité ambiante.

3.1.8 Béton précontraint – Béton réfractaire

Pour l'emploi du béton en association avec des armatures postcontraintes il est recommandé de choisir une formulation avec utilisation de granulats dont les critères de qualité sont impérativement tous de classe A indicé A (voir spécifications ci-dessous). Pour les sables, le critère de propreté doit être caractérisé par une valeur d'équivalent de sable supérieur à 85.

Pour un emploi du béton projeté dans un site soumis à de fortes températures (four de cimenterie par exemple), il est impératif d'utiliser un mélange formulé à partir de ciments et de granulats qualifiés de "réfractaires", ces formulations sont élaborées par des fournisseurs spécialisés en matériaux réfractaires.

3.2 Granulats pour bétons et mortiers projetés

Les spécifications des granulats sont celles des normes NF EN 12-620 (granulats pour bétons) , NF EN 13-139 (granulats pour mortiers) et XP P 18-545.

Dans cette dernière norme, les granulats sont codifiés par des lettres (A, B, C et D). Ces codes sont de plus indicés. Dans un C.C.T.P., en fonction des classes d'environnement, il convient de préciser les codes et indices correspondant aux conditions du projet (voir chapitre 10 de la norme XP P 18-545).

Pour tenir compte du mode de mise en œuvre, le code à spécifier pour la commande des granulats pour béton projeté est le code A : les caractéristiques doivent toutes être indicées A.

Pour les bétons de résistance de classe supérieure ou égale à C45/55, les valeurs suivantes sont à spécifier :

	Valeur spécifiée (Vss) à 90% si plus de 14 résultats
Module de finesse Valeurs limites MF _A Tolérances sur V _s	$2,4 \leq MF \leq 3.2$ $E 0,6 (\pm 0,3)$
Absorption d'eau ABA	$V_{ss} \leq 2,5$
Résistance mécanique Coefficient de Los Angeles LAA	$LA \leq 30\%$
Coefficient d'aplatissement D ≤ 10mm AA D ≥ 10 mm AA (NFP 18-561)	$FI \leq 25\%$ $FI \leq 20\%$
Propreté des sables SE	$SE \geq 85$

3.2.1. Gravillons

La codification à spécifier est Gr_A. L'attention est attirée sur l'incidence de l'angularité des granulats, caractérisée par le coefficient d'aplatissement qui n'est plus mesuré que sur les matériaux alluvionnaires ou marins au sens de la norme XP P 18-545.

Pour la formulation d'un mélange destiné à la projection il convient de vérifier que les gravillons issus de matériaux concassés sont proches des valeurs indiquées dans le tableau ci-avant.

Pour la voie mouillée

En cas d'emploi de gravillons concassés, il est nécessaire d'améliorer la formulation avec un adjuvant pour le pompage.

Pour la voie sèche

En cas d'emploi de gravillons secs et poreux, il y a un risque d'affaiblissement de la liaison pâte/granulats par absorption de l'eau, cela justifie le critère d'absorption d'eau des gravillons inférieur à 2,5.

3.2.2. Sables

Compte tenu de l'importance de la propreté des sables, la valeur exigée pour l'équivalent de sable visuel doit être supérieure ou égale à 85. Cette valeur est plus sévère que celle exigée dans la norme XP P18-545 mais elle conditionne les critères de qualité du béton projeté ainsi qu'un bon passage en machine. Elle est indispensable pour les résistances \geq à 40 MPa.

3.3 Fibres

Les fibres employées dans les bétons et mortiers projetés sont du même type que celles employées pour les bétons et mortiers coulés.

Les éléments spécifiques aux caractéristiques des fibres ne sont pas repris dans ce document, se référer à la norme NF EN 14889-1 pour les fibres d'acier et à la norme NF EN 14889-2 pour les fibres polymères, ainsi qu'aux documents techniques des fabricants.

Il faut noter qu'il n'a pas été possible de transformer « fibres d'acier » en « fibres métalliques » dans la norme européenne à cause de la présence de cette dénomination dans une norme européenne antérieure en cours d'application. Néanmoins, le groupe de travail « béton projeté » a admis l'utilisation de la norme NF EN 14889-1 pour les fibres de fonte amorphe citées ci-après (*la fonte amorphe contient, comme l'acier, du fer, du carbone mais avec un pourcentage plus élevé, et du chrome*).

Les fibres sont utilisées pour répondre à différentes attentes :

- Anti-fissuration de retrait (fibres métalliques ou synthétiques)
- Amélioration du comportement en flexion (plutôt fibres métalliques, voire certaines fibres synthétiques sous réserve de confirmer le caractère ductile de la rupture)
- Résistances aux chocs (fibres métalliques)
- Résistance à la corrosion (fibres synthétiques ou en fonte amorphe ; à noter toutefois que pour les fibres métalliques classiques la corrosion est superficielle et ne peut être gênante qu'au plan esthétique)
- Limitation des phénomènes d'écaillage en cas d'incendie (fibres polypropylènes monofilament de diamètre inférieur à 50 μ m).

3.3.1 Teneur en fibres

Le dosage en fibres dans le mélange de départ doit tenir compte du taux d'appauvrissement lié au mode de projection, à savoir, à titre indicatif pour les fibres métalliques :

- 30 à 50 % en voie sèche,
- 5 à 20 % en voie mouillée.

3.3.2 Précautions

Certaines fibres présentent une incompatibilité avec un milieu alcalin. C'est le cas des fibres de polyester et des fibres de verre dont la protection des extrémités ou des surfaces de rupture peut poser problème.

3.4 Adjuvants et additions pour béton projeté

3.4.1 Définition, mise en œuvre et normalisation

Pour les bétons coulés, les **adjuvants** sont des composants qui s'emploient à un dosage ≤ 5 % du poids du ciment. Au-delà de 5 % on parle d'**additions**. Pour les bétons projetés, on peut aller au-delà de 5% pour les adjuvants spécifiques (voir NF EN 934-5).

Les adjuvants et additions se présentent soit sous forme de liquides, soit sous forme de poudres. Dans tous les cas, ils sont mis en œuvre avec un contrôle du dosage, au même titre que tout autre composant entrant dans la formule de béton.

On les met en œuvre :

- lors de la fabrication des produits pré-mélangés en usine et livrés sur chantier en sacs, big-bags ou en silos (adjuvants en poudre)
- ou
- lors du malaxage en centrale BPE (forme poudre ou liquide)
- ou
- lors de la projection, à la sortie en extrémité de la conduite.

Dans tous les cas il faut s'assurer de leur répartition homogène dans le béton.

Les adjuvants « classiques » du béton font l'objet de la norme NF EN 934-2.

Il existe une norme (NF EN 934-5) qui s'applique aux adjuvants du béton projeté.

Cette norme introduit notamment des éléments concernant l'alcalinité et l'acidité des produits.

3.4.2 Quel adjuvant employer ?

La question à se poser est :

« Quelle est la ou les caractéristiques du béton frais ou durci que je souhaite apporter ou modifier ? »

Le choix d'un adjuvant ou d'une addition se définit dans un premier temps en terme de famille de produit : plastifiant, superplastifiant, entraîneur d'air, accélérateur, stabilisateur, hydrofuge, addition siliceuse, calcaire, etc.

3.4.2.1. Cas des accélérateurs

Ils peuvent être classés en deux familles en fonction de leur action :

Famille 1 : à court terme (en quelques dizaines de minutes, voire quelques heures) : il s'agit des accélérateurs de durcissement. Ils ont pour rôle d'accélérer la vitesse de montée en résistance du béton à court terme par une accélération de la formation des hydrates.

Famille 2 : à très court terme : il s'agit des raidisseurs (action instantanée) et des accélérateurs de prise (action en quelques minutes). Les raidisseurs ont pour rôle d'accélérer la rigidification au contact du support. Après la rigidification, les accélérateurs de prise permettent de réaliser, après quelques minutes, une nouvelle passe de projection sur la passe précédente ayant commencé sa prise. De cette façon, il est possible de projeter une couche épaisse en plusieurs passes dans un même poste de projection.

Les adjuvants pour béton projeté (cf NF EN 934-5) cumulent généralement les fonctions de raidissement et d'accélération de la prise.

Il faut s'assurer qu'ils ne nuisent pas à la résistance à plus long terme ou à la durabilité.

Il est donc important, quelle que soit la dénomination employée, accélérateurs, raidisseurs, activateurs ou autre, de bien définir le moment où on veut obtenir l'accélération : au moment de l'arrivée du béton sur le support ou pour pouvoir solliciter plus rapidement le matériau ?

Il est précisé que, si certains accélérateurs de durcissement peuvent avoir une action sur la durée de prise, à l'inverse les accélérateurs de prise n'accélèrent pas la montée en résistance.

La fonction anti-gel des accélérateurs de prise n'est pas à prendre en compte car la projection doit s'effectuer (sauf cas particulier) sur un support dont la température est supérieure à +5°C.

On désigne généralement comme « alcalins » les produits à base d'aluminates et de silicates de sodium.

Les aluminates sont interdits en France.

L'ASQUAPRO propose d'interdire l'emploi des silicates, du fait :

- ✓ qu'ils présentent des risques importants pour la santé des utilisateurs et l'environnement,
- ✓ qu'ils nuisent fortement aux résistances mécaniques des bétons, à moyen et long terme, en cas de dépassement d'un dosage de 3% à 5% suivant les produits,
- ✓ qu'ils apportent des alcalins supplémentaires (bilan des alcalins vis-à-vis de l'alcali-réaction).

Il est important de spécifier cette interdiction des accélérateurs alcalins dans les C.C.T.P. de façon à éviter que certaines entreprises fassent leur chiffrage sur la base de ces produits peu coûteux.

Les produits « non alcalins » couvrent aujourd'hui toute la gamme d'utilisation possible.

3.4.2.2. Quelle famille de produit ?

Les tableaux suivants permettent de déterminer la famille de produits à employer en fonction des caractéristiques du béton frais ou durci que l'on souhaite apporter ou modifier.

Caractéristiques recherchées	Mode de projection	Type d'adjuvants et ajouts	Effet recherché	Effet négatif et correction possible	Méthode d'évaluation
pompabilité	VM	Plastifiants Superplastifiants	Augmente la plasticité à teneur en eau constante	Peut modifier le temps de prise. Peut entraîner de l'air. Nécessite l'emploi d'un accélérateur de prise	Mesure de la pression de pompage
		Retardateurs de prise	Permet de maintenir l'ouvrabilité du béton en fonction du dosage	Bloque la prise . Nécessite l'emploi d'un activateur	Vérification de la plasticité
Amélioration des résistances	VM	Plastifiants, Superplastifiants	A teneur en eau constante augmente la plasticité. Nécessite l'emploi d'un raidisseur pour la tenue du béton	Peut modifier le temps de prise Peut entraîner de l'air	Mesure de l'épaisseur mise en place
Tenue en place	VM	Entraîneurs d'air	Augmente le rendement volumique	Diminution des résistances mécaniques	Mesure de l'épaisseur mise en place
Tenue en place	VM	Accélérateurs de prise	Réduit le temps de mise en œuvre du béton. Augmente de l'épaisseur mise en place	Diminution possible des résistances Défauts d'enrobage des armatures	Mesure de l'épaisseur mise en place
		Fumées de silice	Augmente la thixotropie et la cohésion du béton	Tendance à flocculer à corriger par un superplastifiant. Augmente le retrait	Mesure de l'épaisseur mise en place
		Raidisseurs	Réduit le temps de mise en œuvre du béton. Modifie le rebond et la compacité. Augmente l'épaisseur mise en place	Diminution possible des résistances Défauts d'enrobage des armatures	Mesure de l'épaisseur mise en place
	VS	Fumées de silice	Augmente la thixotropie et la cohésion du béton	Tendance à flocculer	Mesure de l'épaisseur mise en place
Augmentation des résistances initiales	VM	Accélérateurs de durcissement	L'effet est fonction de la température. Il peut être intéressant de les coupler avec un superplastifiant.	Peut diminuer les résistances à plus long terme. Augmente le retrait. Peut accélérer le début de prise	Mesure des résistances mécaniques au jeune âge
	VS	Accélérateurs de durcissement	L'effet est fonction de la température	Peut diminuer les résistances à plus long terme du béton. Augmente le retrait. Peut accélérer le début de prise	Mesure des résistances mécaniques au jeune âge

Caractéristiques recherchées	Mode de projection	Type d'adjuvants et ajouts	Effet recherché	Effet négatif et correction possible	Méthode d'évaluation
Augmentation des résistances mécaniques	VM	Plastifiants Superplastifiants	Réduction de la teneur en eau à ouvrabilité constante	Peut modifier le temps de prise. Peut entraîner de l'air.	Mesure des résistances mécaniques
		Fumées de silice	Réaction pouzzolanique et augmentation de la compacité	Tendance à flocculer (à corriger par un superplastifiant)	Mesure des résistances mécaniques
Diminution du retrait	VM	Plastifiants Superplastifiants	Réduction de la teneur en eau à ouvrabilité constante	Peut modifier le temps de prise. Peut entraîner de l'air.	Mesure du retrait
Augmentation de la durabilité	VM	Plastifiants Superplastifiants	Réduction de la teneur en eau à ouvrabilité constante. Amélioration de la compacité	Peut modifier le temps de prise. Peut entraîner de l'air.	Mesure de la porosité
		Fumées de silice	Augmente la compacité, la résistance à l'abrasion, à certains environnements agressifs et à l'alcali-réaction	Tendance à flocculer (à corriger par un superplastifiant) Augmente le retrait	Mesure de la porosité
	VS	Fumées de silice	Augmente la compacité, la résistance à l'abrasion, à certains environnements agressifs et à l'alcali-réaction	Tendance à flocculer (à corriger par un superplastifiant) Augmente le retrait	Mesure de la porosité
Résistance aux effets du gel	VM	Entraîneurs d'air	Augmente le rendement volumique. formation de micro bulles d'air réparties dans la matrice	Diminution des résistances mécaniques	Mesure de la distance moyenne entre bulles sur prélèvements de béton durci
		Plastifiants Superplastifiants	Réduction de la teneur en eau à ouvrabilité constante. Amélioration de la compacité.	Peut modifier le temps de prise. Peut entraîner de l'air.	Essai d'écaillage
Etanchéité	VM	Hydrofuges de masse	Obturation du réseau capillaire		Mesure de la perméabilité à l'eau sous pression

Caractéristiques recherchées	Mode de projection	Type d'adjuvants et ajouts	Effet recherché	Effet négatif et correction possible	Méthode d'évaluation
		Plastifiants Superplastifiants	Réduction de la teneur en eau à ouvrabilité constante. Amélioration de la compacité	Peut modifier le temps de prise Peut entraîner de l'air	Mesure de la perméabilité à l'eau sous pression
	VS	Hydrofuges de masse	Obturation du réseau capillaire		Mesure de la perméabilité à l'eau sous pression

Remarque : Lorsque, pour une caractéristique donnée, le tableau ne présente pas de rubrique concernant la voie sèche, l'effet recherché peut être obtenu en jouant sur la formulation du béton (granulométrie, dosage en ciment, etc.). Il est toujours préférable de commencer par adapter la formulation aux caractéristiques recherchées.

3.4.2.3. Quel produit dans la famille ?

Une fois le choix de la famille effectué, il convient de sélectionner le produit adapté dans l'offre proposée par les différents fabricants.

Les questions à se poser sont les suivantes :

- Quels sont les effets secondaires, acceptables ou non pour l'application visée ?
- Quelles sont les impacts sur l'hygiène et la sécurité (poussières, effets d'aérosol, ...) ?
- Quelles sont les conditions de stockage des produits ? (durée de stockage, mise hors gel, ...)
- Le produit est-il simple d'emploi (facilité de dosage, conséquence d'une erreur de dosage, ...) ?

3.4.2.4. Ne pas oublier que :

Un bon adjuvant ne compense jamais une mauvaise formulation de béton. Il est là pour améliorer certaines de ces caractéristiques ou performances.

Dans le cas d'utilisation d'un adjuvant, celui-ci est pris comme une partie intégrante de la formulation du béton et sa compatibilité avec les autres constituants doit être vérifiée.

Il faut lire impérativement la fiche technique et la fiche de sécurité des produits.

On ne mélange pas des adjuvants sans demander l'avis du fournisseur et/ou sans essai préalable.

3.5 L'eau

Mêmes critères que pour le béton coulé, seul diffère le moment d'introduction en fonction du mode de projection.

Elle doit donc être conforme à la norme NF EN 1008 « eau de gâchage pour béton ».

4 BETONS ADAPTES A DES BESOINS SPECIFIQUES

4.1 Bétons mis en œuvre par temps chaud ou temps froid

4.1.1 Généralités

Les précautions à prendre pour obtenir des bétons projetés de qualité même par temps chaud ou froid suivent les mêmes règles de l'art que pour les bétons coulés. Elles sont à prendre en considération au niveau de la formulation du béton et au niveau de sa mise en œuvre.

Une des particularités du béton projeté est d'être utilisé en épaisseur moyenne (10-20 cm), rarement protégé par un coffrage et rarement en béton de masse. De ce fait, les bétons projetés sont plus sensibles aux températures extérieures : celle du support et celle de l'air extérieur.

Or, aux jeunes âges, la vitesse d'hydratation du ciment, donc du durcissement du béton, est pratiquement proportionnelle à sa température et la durabilité du béton se joue au tout premier âge puisque c'est à ce moment qu'il possède une vulnérabilité maximale au phénomène de dessiccation.

4.1.2 Les conséquences de la chaleur

4.1.2.1 Sur le béton frais (avant prise)

Les modifications de la cinétique d'hydratation du ciment entraînent :

- une prise plus rapide,
- une perte de rhéologie.

La maniabilité du béton se dégrade plus rapidement. Elle peut amener des difficultés de pompage et de mise en place du béton projeté par voie mouillée.

L'évaporation plus rapide de l'eau de gâchage provoque :

- un raidissement plus rapide,
- et donc un risque de rajout d'eau intempestif qui serait néfaste au béton.

A titre d'exemple sur un mélange plastique pour une projection par voie mouillée, un affaissement au cône d'Abrams de l'ordre de 10 cm mesuré pour une température du béton frais de 20°C passera à environ 4 à 5 cm si la température augmente à 35°C.

Sur un mélange pulvérulent humide pour une projection par voie sèche, le temps d'emploi \hat{R} du malaxage à la projection \hat{R} sera réduit de 2 heures pour une température de 20°C à 45 minutes si la température monte à 35°C.

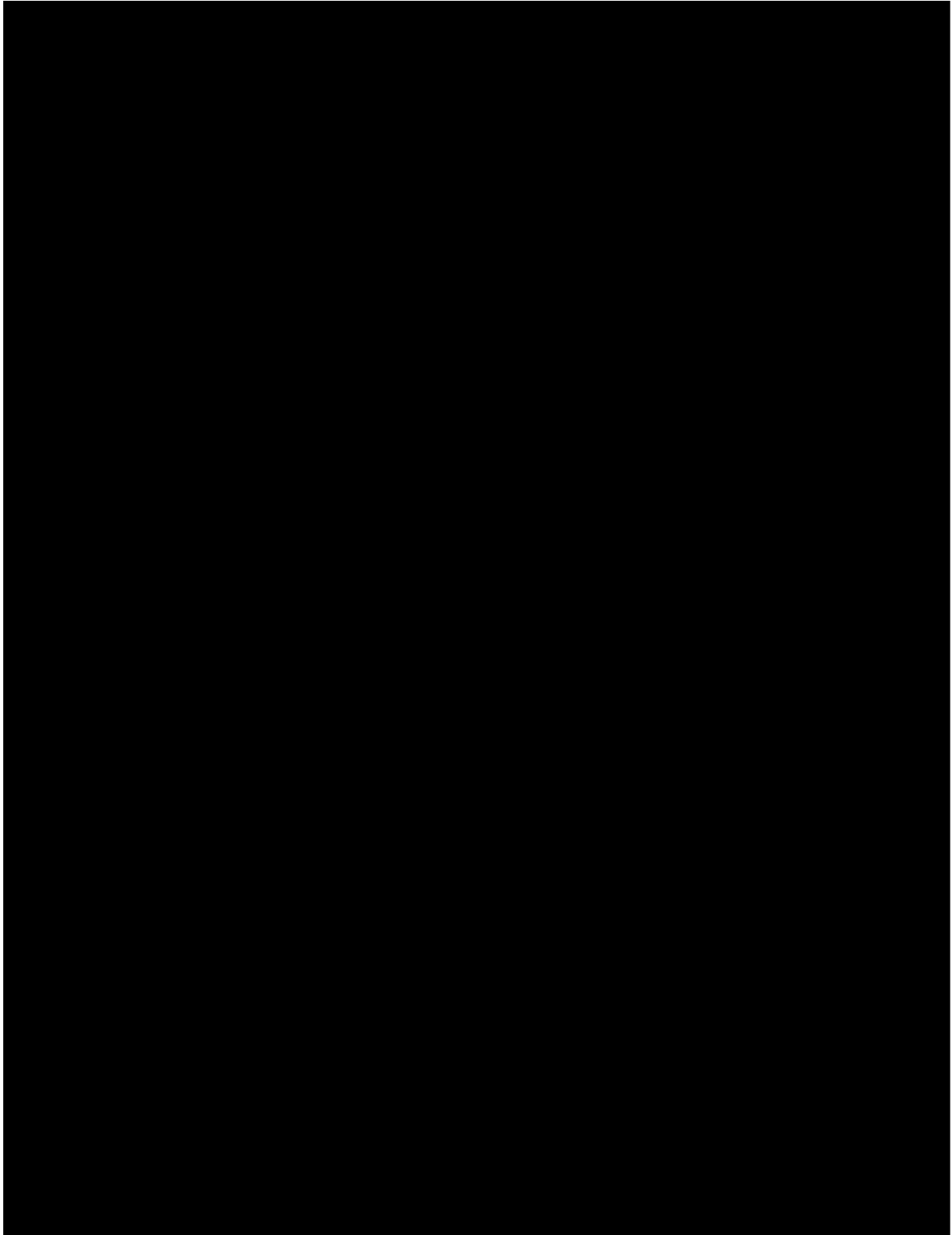
4.1.2.2 Sur le béton au jeune âge (après le début de prise)

Une accélération du processus de durcissement du béton due à une élévation de température induit :

- une augmentation des résistances aux jeunes âges,
- mais une structure minéralogique peu ordonnée et donc des résistances à 28 jours plus faibles (l'optimisation des résistances à long terme étant obtenue avec une cure à 13°C).

L'évaporation plus rapide de l'eau à partir d'une température $> 35^{\circ}\text{C}$, d'une hygrométrie $< 65\%$ et d'une vitesse du vent $> 20\text{ km/h}$ entraîne :

- une augmentation de la porosité et de la perméabilité de la couche superficielle du béton,
- une détérioration de l'interface pâte-granulat,
- une moindre protection des armatures (carbonatation de la couche de surface plus poreuse),
- un affaiblissement des propriétés mécaniques,
- un affaiblissement de la liaison par adhérence,
- une hydratation imparfaite du ciment,
- une fissuration due au retrait plastique.



4.1.3 Règles à retenir par temps chaud

REGLES LIEES A LA FORMULATION

Ciment :

- utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation,
- limiter l'emploi de ciments de classe R (trop réactif)

Granulats :

- propres et protégés du soleil lors du stockage
- éviter les granulats à porosité importante
- dans le cas de projection par voie sèche veiller à ce que la température des granulats ne soit pas trop importante après leur séchage.

Eau de gâchage :

- pour la voie sèche, pas de recommandations particulières
- pour voie mouillée, appliquer les dispositions du BPE
- ne jamais rajouter d'eau à l'arrivée sur le chantier

Adjuvants :

- pour la voie sèche pas de recommandations particulières
- pour la voie mouillée, utiliser des retardateurs de prise, les plastifiants ont un effet secondaire de limitation de la dessiccation

REGLES LIEES A LA MISE EN ŒUVRE

VOIE SECHE

Produits pulvérulents secs :

température de stockage inférieure à 50° C

Produits pulvérulents humides :

Limiter le temps d'emploi entre le malaxage et la mise en œuvre en fonction de la température :

- température \leq à 20°C : temps d'emploi jusqu'à 2 heures
- de 20°C à 25°C : temps d'emploi jusqu'à 1h30
- de 25°C à 30°C : temps d'emploi jusqu'à 1h
- de 30°C à 35°C : temps d'emploi jusqu'à 45min
- au-delà de 35°C : différer la projection

VOIE MOUILLEE

Produits plastique, mélange BPE :

- Si la formulation ne prend pas en compte les contraintes de température, appliquer les mêmes règles que pour le mélange pulvérulent humide.
- Si la formulation prend en compte l'ajout d'adjuvants retardateurs de prise, le temps d'emploi doit être validé par des essais de convenance.

PROTECTION CONTRE LA DESSICCATION (VS et VM)

- L'action la plus efficace est l'humidification pendant une semaine (strict minimum 72 h), par pulvérisations régulières d'eau.
- On peut utiliser des produits de cure ou mettre en place des géotextiles humides éventuellement complétés par des bâches plastiques, permettant d'éviter la dessiccation (en fonction de la vitesse d'évaporation, l'efficacité des produits de cure peut être limitée).

4.1.4 Règles à retenir par temps froid

On rappelle que la température du support doit être supérieure à 5°C. Ceci est particulièrement important pour les revêtements de faible épaisseur.

Exceptionnellement, pour des raisons d'urgence et pour des revêtements de protection de terrain, on peut envisager de travailler à des températures inférieures en prenant en compte les recommandations suivantes, tout en sachant qu'il y aura retard de prise et de durcissement.

Pour une température de support entre 0°C et 5°C :

REGLES LIEES A LA FORMULATION

Ciment :

- utiliser des ciments à chaleur d'hydratation élevée, à fortes résistances initiales ou des ciments spéciaux rapides
- Augmenter le dosage en ciment,

Eau : la chauffer

Adjuvants : réducteur d'eau, accélérateur.

Granulats : les chauffer

Mélange sec prêt à l'emploi : le chauffer

REGLES LIEES A LA MISE EN ŒUVRE

augmentation de la durée de malaxage.

transport et mise en œuvre rapide,

soigner la cure du béton mais la cure par arrosage est interdite, elle doit être remplacée par la mise en place d'un film plastique recouvert d'un isolant de type laine de roche ou tout autre protection thermique.

4.2 Bétons à prise et/ou durcissement rapide

4.2.1 Généralités

La technologie du béton projeté est bien adaptée à la mise en place des bétons à prise rapide et à durcissement rapide. Dès que celui-ci est projeté en épaisseur suffisante, la prise peut se faire. Celle-ci est immédiatement suivie par le durcissement du béton.

Le phénomène de prise intervient juste après la perte de maniabilité. Il correspond à un changement d'état, une « coagulation », provoquant une rigidification du béton. C'est un épisode transitoire.

Le phénomène de durcissement correspond à la formation et à la précipitation des minéraux hydratés qui solidifie la matrice cimentaire. Les résistances induites sont alors mesurables et augmentent dans le temps.

En béton projeté par voie mouillée, les opérations successives de malaxage, de transport et de pompage imposent des contraintes de temps dont il faut tenir compte dans le choix du ciment. L'ajout de l'accélérateur se faisant à la lance, il n'y a pas de problème de délais de raidissement prématuré du béton.

Le béton projeté par voie sèche n'ayant pas ces contraintes de tenue de la maniabilité dans le temps, l'accélérateur peut être ajouté soit en bout de lance sous forme liquide, soit en poudre dans le mélange à projeter sec, au moment de son introduction dans la machine.

4.2.2 Les besoins

Les mélanges à projeter à prise rapide et à durcissement rapide sont très utiles :

- pour tenir et adhérer sur support humide et/ou ruisselant sans s'affaisser,
- pour obtenir une remise en service rapide de l'ouvrage traité,
- pour appliquer rapidement une épaisseur importante sans affaissement,
- pour mettre en sécurité une paroi,
- à basses températures, pour atteindre un seuil minimum de résistance avant la venue du gel,
- pour augmenter les cadences d'avancement.

4.2.3 La classification

Se référer au tableau 8 de la norme NF EN 14 487-1.

4.2.4 Comment les obtenir ?

Nous avons le choix entre l'utilisation d'accélérateur de prise pour ciment Portland ou l'utilisation de ciment à prise et durcissement rapide.

4.2.5 Les accélérateurs

Ils sont utilisés :

- soit à des dosages d'adjuvant (< 5%),
- soit à des dosages d'additions, entre 5 et 10% du poids de ciment (voir norme NF EN 934-5).

Dans tous les cas, ils doivent être considérés comme des composants à part entière du béton.

Il est important de tenir compte du mode de dosage de l'accélérateur. L'ajout d'un produit liquide au niveau de la lance se fait de manière volumétrique. De ce fait, il n'aura pas la précision et la fiabilité d'un accélérateur en poudre dosé de manière pondérale en usine dans un béton sec prêt à l'emploi.

Les accélérateurs sont nombreux et de composition variée. N'oublions pas que le premier des accélérateurs est la chaleur. Il est possible de distinguer les grandes familles :

- les chlorures de calcium,
- les bases alcalines et leurs sels : KOH, NaOH et les silicates et aluminates de sodium,
- les nitrates et nitrites de calcium,
- le formiate de calcium,
- les dérivés de l'aluminium : les hydroxydes, sulfates d'aluminium et aluminates réactifs.

Ces ajouts, en modifiant le processus d'hydratation, peuvent avoir des conséquences sur la durabilité du béton :

- par exemple, le chlorure de calcium va former un monochloroaluminate de calcium qui a la particularité de corroder les aciers. C'est pourquoi l'utilisation des chlorures de calcium est très réglementée,

- la cinétique de durcissement peut être modifiée. Dans le cas d'utilisation des bases alcalines et de leurs sels, les résistances du béton à 28 jours peuvent être plus faibles que les bétons témoins sans accélérateur.

Il est à nouveau rappelé que certains produits sont d'utilisation dangereuse pour l'homme et son environnement (silicates et aluminates de sodium).

Les accélérateurs de dernière génération, non alcalins, ne présentent pas ces défauts.

Quels que soient les produits utilisés, il est impératif de suivre les conseils de compatibilité avec le type de ciment et d'utilisation des fournisseurs.

4.2.6 Les ciments rapides

-particularités des ciments employés

Plus adaptés à la voie sèche, ils présentent la particularité d'avoir une composition minéralogique spécifique qui donnera, après hydratation, une prise et un durcissement rapide sans avoir recours à des accélérateurs. La rapidité est apportée :

- par des minéraux tels que certains aluminates et sulfoaluminates de calcium en proportion plus ou moins importantes. Les autres minéraux présents sont plus classiques (silicates tri- ou di-calciques),
- par une finesse souvent plus élevée que les ciments Portland courants,
- par l'absence de gypse qui en tant que régulateur de prise va à l'encontre de la rapidité.

On distingue :

- les ciments rapides en tant que tels :

Ciment Prompt Naturel (CNP PM - NF P 15-314)
Vicalpes
Chronolith
Surpracem
Dorocem, etc...

- les ciments alumineux (NF EN 14647),

Ils ont un durcissement rapide (dès 4 à 5 heures) mais un temps de prise classique.

Un dosage minimum (400 kg/m³) ainsi qu'un rapport eau/ciment maximum (0,4) sont à utiliser pour optimiser la durabilité de ce genre de béton. En effet, dans certaines conditions, le phénomène de conversion, qui est une transformation des hydrates, peut entraîner des baisses de résistances à des échéances plus ou moins longues,

- les ciments prise mer (NF EN 14647)

- les mélanges de ciments Portland avec les ciments alumineux présentent la particularité d'une prise rapide dans une certaine proportion de chacun d'entre eux. Pour que la montée en résistance se fasse de manière progressive et continue, il est nécessaire d'utiliser un adjuvant

- les clinkers de ciments Portland sans ajout de gypse.

Le rôle régulateur de celui-ci n'est plus recherché.

4.2.7 Règles de formulation

4.2.7.1 règles générales

Les bétons rapides suivent les mêmes règles de formulation que les bétons de ciment Portland en ce qui concerne la granulométrie. Seul le dosage de l'accélérateur ou du ciment rapide diffère des bétons projetés classiques.

Il est conseillé de contacter les fournisseurs pour avoir des caractéristiques plus précises sur les dosages d'accélérateur ou de ciment rapide.

4.2.7.2 dosages

Dans le cas de l'utilisation d'un ciment rapide, son dosage est fonction aussi bien des résistances aux jeunes âges que de celles à 28 jours.

Dans le cas de l'utilisation d'un accélérateur, les résistances initiales sont fonction de son dosage. Les résistances à l'échéance de 28 jours dépendent du type d'accélérateur utilisé, de son interaction avec le type de ciment et du dosage de ce dernier. L'effet d'un accélérateur sera différent entre un ciment CEM I 52.5 et un CEM II ou III.

Le tableau ci-dessous résume, à titre indicatif, l'efficacité maximum des différentes solutions à dosage courant en fonction de la température en reprenant la classification énoncée ci-dessus :

Température du béton frais	Béton à base de CEM I accéléré		Béton à base de ciment rapide		
	Adjuvant < 5%	Additif > 5%	Portland gypse	sans	Autres rapides ciments
5 à 15°C	J1	J 2	J 1		J 3
15 à 25°C	J2	J3	J 2		J 3
25 à 35°C	J3	J3	J 3		J.3

4.2.7.3 exigences

Le choix de la classe de résistance désirée aux jeunes âges sera fonction des performances demandées à ce béton.

Par exemple, la résistance peut être :

- d'environ 1 MPa à quelques minutes si l'on désire juste un effet anti-affaissement,
- à plus de 10 MPa à 3 heures si l'on veut que ce béton soit rapidement sollicité.

Il est très important d'envisager la durabilité à long terme de ce genre de béton dès le début de la formulation, et de choisir le ciment ou l'accélérateur le mieux adapté.

4.2.8 Rôle de la température

La formulation de ces bétons doit tenir compte de la température ambiante lors de l'application. Comme tous les bétons, leur temps de prise et leur cinétique de durcissement seront fonction de :

- la température de chaque ingrédient (ciment, sable, eau etc...),

- la température du support,
- la température ambiante.

A même niveau d'exigence de résistance, un béton rapide appliqué en été a besoin d'un dosage en accélérateur moins important qu'en hiver. C'est pour cela aussi que la performance d'un béton rapide se juge par température froide.

A contrario, les bétons à base de ciment rapide ont besoin par temps chaud d'un retardateur. Il est nécessaire d'éviter une prise trop rapide avant la fin du compactage par martelage des graviers. Une prise excessivement rapide peut se traduire par une compacité plus faible et donc des résistances également plus faibles.

4.3 Bétons résistant au gel-dégel

Pour le béton projeté par voie mouillée, les recommandations classiques de la norme NF EN 206-1 (tableau F1 en annexe F) et les Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel éditées par le LCPC en décembre 2003, sont applicables mais on connaît peu de cas pratiques d'application vu les domaines d'emploi de la voie mouillée.

Pour le béton projeté par voie sèche, le principe de mise en œuvre permet d'obtenir des teneurs en air proches de celles indiquées dans le tableau F1 de la norme NF EN 206-1 [Gérôme]. Les retours d'expérience montrent qu'on peut obtenir une excellente durabilité, même en régions très froides, sans avoir besoin de recourir à des entraîneurs d'air dont la maîtrise serait par ailleurs délicate en voie sèche.

4.4 Bétons à hautes performances

La formulation d'un tel béton nécessite la même rigueur que les bétons classiques à haute performance en ce qui concerne la voie mouillée. Pour les bétons « voie sèche » il est impératif d'utiliser des granulats de code A indice A.

L'attention est attirée sur l'effet de mouillage des grains de fumée de silice qui va se traduire par un supplément d'eau délicat à compenser par un ajout de superplastifiants réducteur d'eau pour obtenir une réduction du rapport eau/liant équivalent.

5 BETONS DE SABLE

Ces bétons font l'objet d'une norme NF P 18-500 et d'un guide qui ont été publiés après les expérimentations conduites dans le cadre du Projet National SABLOCRETE .

On parle de « béton de sable » et non de mortier car leur dosage en ciment est semblable à celui d'un béton traditionnel. Ils ne contiennent pas de gravillons. Ils sont formulés à partir d'un sable 0-4 mm et d'une forte proportion de fillers.

Leur projection s'effectue uniquement en voie mouillée.

Leur domaine d'emploi est lié à leur aptitude à être transportés sur de longues distances et aux faibles pertes qu'ils génèrent. Ceci est particulièrement intéressant dans les petites galeries d'assainissement.

6 REFERENCES CITEES DANS LE FASCICULE

Norme AFNOR

NF P 95-102	2002	Réparation et renforcement par béton projeté (des ouvrages d'art)
XP P 18-545	2008	Granulats pour béton : définition, conformité, codification
NF P 15-314	1993	Ciment Prompt
NF P 18-500	1995	Béton de sable

Normes européennes homologuées par l'AFNOR (NF EN)

NF EN 14487-1	2006	Béton projeté : définitions, spécifications et conformité
NF EN 14487-2	2006	Béton projeté : Exécution
NF EN 206-1	2002	Béton : spécifications, performances, production et conformité
NF EN 197-1	2001	Ciments courants : composition, spécifications et conformité
NF EN 12-620	2008	Granulats pour bétons
NF EN 13-139	2003	Granulats pour mortiers
NF EN 1008	2003	Eau de gâchage pour béton
NF EN 14647	2006	Ciment d'aluminat de calcium : composition, spécifications et conformité
NF EN 14 889-1	2006	Fibres d'acier
NF EN 14 889-2	2006	Fibres polymères
NF EN 934-2	1998	Adjuvants pour béton : définitions, exigences, conformité et marquage
NF EN 934-5	2005	Adjuvants pour bétons projetés : définitions, exigences et conformité
NF EN 1504 – 3	2006	Produits et systèmes de réparations structurelles et non structurelles

Recommandations

AFTES 1993 : La technologie et la mise en œuvre du béton projeté supplément au TOS n°117
 AFTES 1994 : La technologie et la mise en œuvre du béton projeté renforcé de fibres TOS 126
 LCPC décembre 2003 Durabilité des bétons durcis soumis au gel
 ASQUAPRO 1997 Prévention, hygiène et sécurité lors des projections des mortiers et bétons

Fascicules du Guide ASQUAPRO

Fascicule « Mise en œuvre du béton projeté » (2007)

Bibliographie

RESSE C et VENUAT M., 1981, « Projection des mortiers, bétons et plâtres », Techniques et applications, Bâtiment & T.P. Edité par les auteurs

TEICHERT P. 1991 Béton projeté édité par LAICH SA Avegno Suisse

PROJET NATIONAL SABLOCRETE, 1994, Presses de l'ENPC

GEROMEY S., 2003 Evaluation des paramètres d'obtention de la qualité des bétons projetés utilisés dans les soutènements provisoires, des revêtements définitifs et des renforcements d'ouvrages. Thèse sci. : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

7 ANNEXE

- **Fuseaux AFTES et AFNOR**

Les fuseaux granulaires signalés au paragraphe 2.2.2. (page 8 du présent document) ont été publiés, à titre indicatif, dans les recommandations de l'AFTES [TOS 117] en 1974 puis dans la norme NF P 95-102 en 2002, afin d'aider les formulateurs de mélanges à projeter.

Depuis 1974, ces fuseaux ont été utilisés et ont montré leur intérêt. La norme NF EN 14487-1 ne comportant pas de fuseaux conseillés, ceux que nous utilisons avec succès depuis plus de 35 ans risquent de disparaître. Nous les reproduisons donc à titre conservatoire.

- **Note du 21 juin 2010**

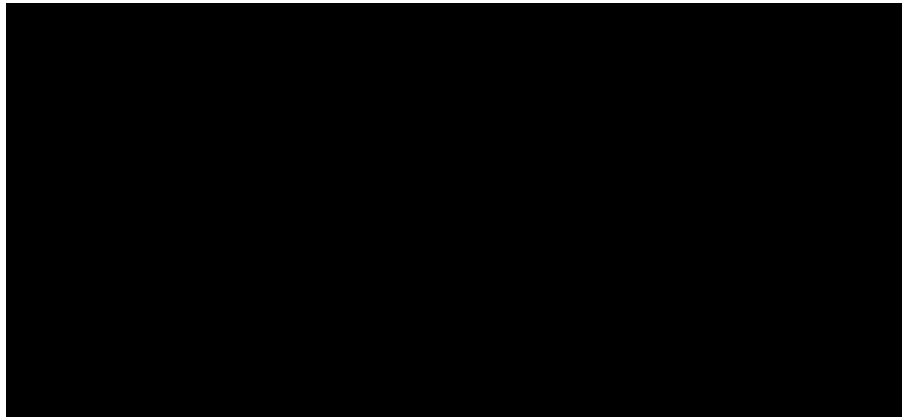
- **Fuseaux proposés par ASQUAPRO**

Les fuseaux AFTES – AFNOR risquant de disparaître comme indiqué ci-dessus, ont d'abord été légèrement modifiés pour tenir compte du remplacement, dans les normes européennes, du tamis de 0,080 mm par celui de 0,063 mm.

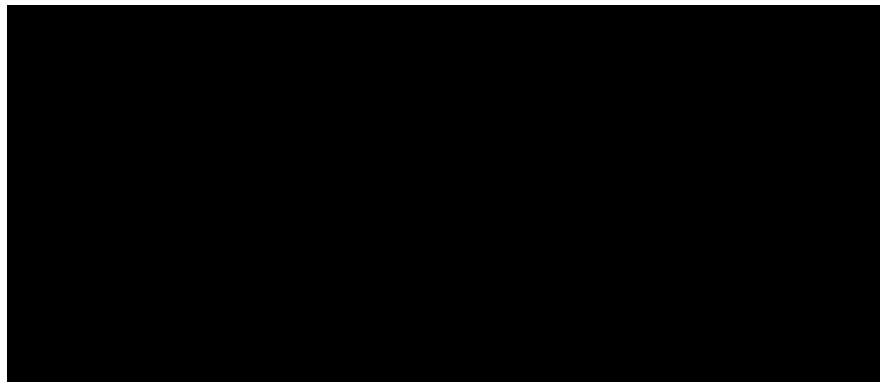
Les retours d'expériences analysés trois décennies ont montré que les formes des fuseaux devaient être modifiées entre les abscisses 0,5 mm et 1,5 mm. (voir note technique Asquapro soulignant l'utilité de ces modifications).

Fuseaux AFTES et AFNOR

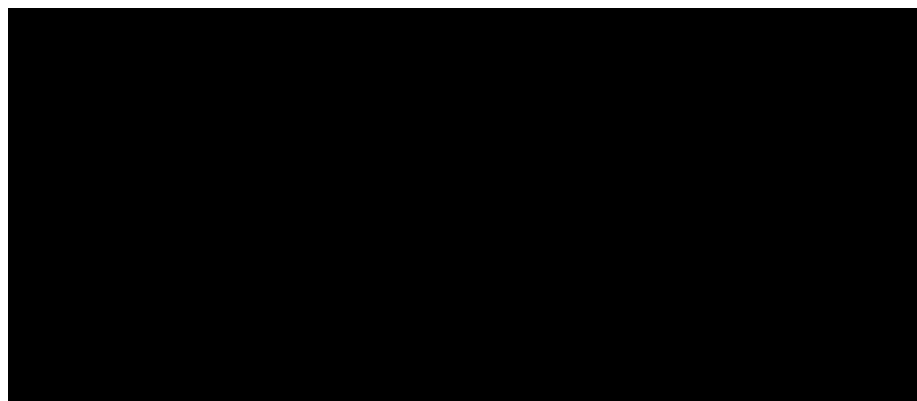
Fuseau de 0 à 8 mm



Fuseau de 0 à 10 mm



Fuseau de 0 à 12,5 mm



Note Asquapro du 21 juin 2010

Utilité des fuseaux granulaires des mélanges à projeter

En 1974, l'Association Française des Travaux en Souterrains a imprimé, dans le premier numéro de sa revue TOS, des fuseaux granulaires destinés à donner des indications sur la granularité « la plus continue possible » qu'il y avait lieu de rechercher pour formuler les mélanges pour bétons destinés à être mis en œuvre par projection.

Depuis leur parution, ces fuseaux que l'EDF avait mis au point pendant les travaux d'aménagement hydraulique Arc-Isère, ont été utilisés en France, par tous les ingénieurs qui formulaient des mélanges à projeter.

Ces fuseaux « AFTES » sont relativement étroits, principalement par rapport aux allemands (DIN), suisses (SEI), américains (ASTM), ce qui est un avantage lorsqu'on cherche à formuler un mélange dont la courbe doit être la plus continue possible.

Les retours d'expérience des chantiers ont alors montré que, lorsque les mélanges à projeter avaient été formulés de manière à ce que leur courbe granulaire s'inscrive dans un des fuseaux recommandés par l'AFTES, la faisabilité de la projection était vérifiée et surtout que le béton mis en œuvre était de bonne qualité.

De ce fait, l'utilisation de ces fuseaux s'est généralisée en France et ils ont été d'abord repris dans le « guide du béton projeté » de l'AFB qui les a étendus aux travaux hors souterrain en 1976, puis par l'AFNOR dans la norme NF P 95-102 homologuée en 1992 et actualisée en 2002.

Les normes européennes NF EN 14487-1 et 14487-2 concernant le béton projeté doivent maintenant être appliquées mais, malheureusement, aucun fuseau granulaire spécifique à un mélange à projeter n'y est proposé, même à titre indicatif.

Si la norme NF P 95-102 est supprimée, les fuseaux que nous utilisons disparaîtront.

Il ne restera alors que ceux des recommandations de l'AFTES et ceux qu'Asquapro pourrait mettre au point en tenant compte des modifications récentes des normes (pour ce qui concerne les dimensions des tamis en particulier) et des retours d'expérience cumulés depuis plus de trente ans.

La présente note est consacrée à la mise au point de ces fuseaux ASQUAPRO.

Modifications proposées par Asquapro

Prise en compte de la série de tamis des normes européennes

Les normes européennes prévoient l'utilisation d'un tamis à mailles carrées de 0,063 mm alors que, jusque là, les analyses granulométriques commençaient, en France, au tamis de 0,080 mm.

L'allure d'une courbe granulaire partant de 0,063 mm est peu différente de celles qui commencent à 0,080 mm, nous allons donc utiliser le tamis de 0,063 mm pour respecter les nouvelles normes.

Il faut toutefois remarquer qu'avec le tamis de 0,063 mm, le passant ne contient pas les grains de ciment supérieurs à cette maille (qui pourtant existent). Lorsque l'on veut déterminer la teneur en ciment et en fines d'un béton venant d'être projeté, il faut donc tenir compte du rapport Ciment/fines qui peut être relevé sur la courbe du mélange aux tamis 0,100 ou 0,125.

Une autre modification concerne la coupure sable/gravillon qui était fixée à 5 mm lorsque les premiers fuseaux AFTES ont été recommandés (en 1974).

Maintenant les sables disponibles chez les fournisseurs sont tous des 0/4 mm, il faut également en tenir compte pour tracer les nouveaux fuseaux.

Modification de la forme des fuseaux

Les retours d'expérience sur les formulations faites pendant 30 ans en utilisant les fuseaux recommandés, ont montré que les courbes sortaient parfois du fuseau, en fonction des granulats disponibles sur le site des travaux.

Dans ce cas, le formulateur recherche le rapport S/G donnant la meilleure courbe et, si cela ne suffit pas, il peut étudier des mélanges ternaires, changer de classe de ciment ou encore ajouter des fillers.

Malgré cela, la courbe peut sortir du fuseau et, dans ce cas, il a été constaté que :

- si elle sort par le bas entre 0,5 et 2 mm, ce n'est pas catastrophique au contraire, car beaucoup de très bons bétons sortent des fuseaux dans cette zone,
- si elle sort par le haut dans cette même zone, le béton risque fort d'être de mauvaise qualité, difficile à projeter et avec beaucoup de pertes.

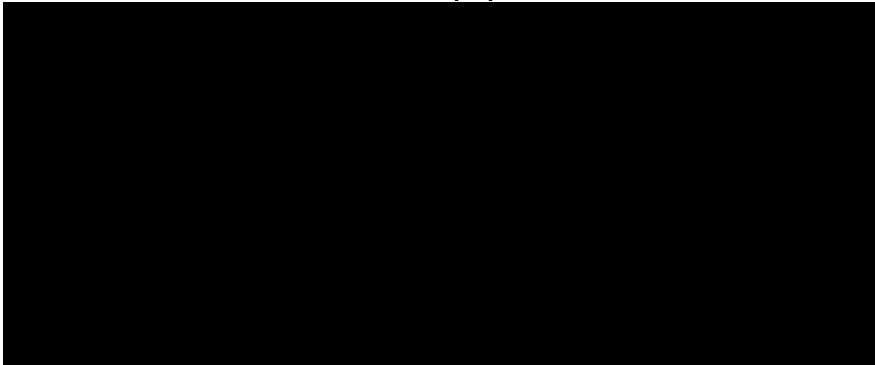
Tous les formulateurs expérimentés ont donc cherché à créer des mélanges les plus continus possibles mais avec une courbe se situant dans la partie inférieure du fuseau entre 0,5 et 2 mm et, si elle sortait du fuseau dans cette zone, ils n'étaient pas inquiets.

Tous ceux qui ont pratiqué de la sorte savaient donc qu'il aurait fallu incurver les fuseaux vers le bas mais les rares qui se sont tracés ces fuseaux modifiés, les ont gardé pour leur usage personnel.

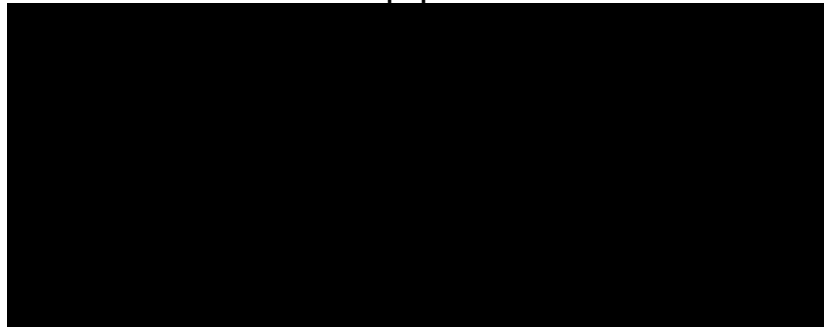
Le comité technique d'ASQUAPRO a décidé de proposer, à titre indicatif, des fuseaux tenant compte de tout ce qui a été exposé ci-dessus. Ces fuseaux sont donc ajoutés au présent fascicule **formulation** du guide technique.

Fuseaux proposés par ASQUAPRO

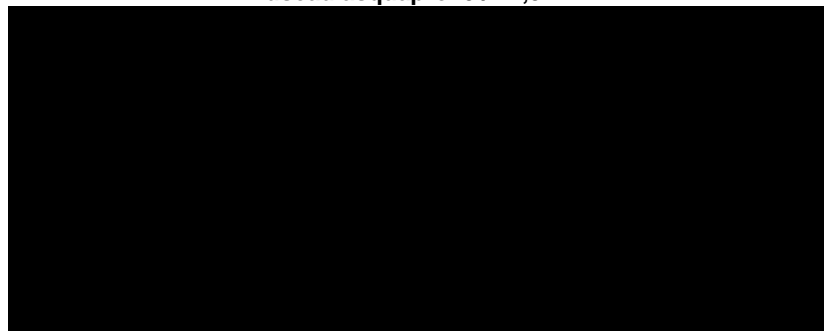
Fuseau asquapro 0 / 8 mm



Fuseau asquapro 0 / 10 mm



Fuseau asquapro 0 / 12,5 mm



Fuseau asquapro 0 / 16 mm

