

1 INTRODUCTION

Dans le cadre du « guide des technologies de projection des bétons » proposé par l'ASQUAPRO, le présent fascicule a pour objet la mise en œuvre des techniques de projection de bétons dans les différents domaines concernés : réparation et renforcement de structures, soutènement et protection, ouvrages neufs (en souterrain ou à l'air libre).

Ce fascicule renvoie si besoin aux autres fascicules du guide, et plus particulièrement à ceux dédiés à la « Formulation », au « Contrôle de la qualité » et au « Dimensionnement ».

Ne sont abordés ici ni le cas des bétons mis en place sous l'eau, ni celui des bétons mis en œuvre à l'aide d'une machine à projeter mais sans véritable projection (mise en place de béton dans une saignée de pré découpage en souterrain).

2 SPECIFICITES DE LA PROJECTION

2.1 Rappel technologique sur la projection de béton

Le béton projeté est mis en œuvre par transfert dans un tuyau d'un mélange de ciment et de granulats, puis par projection à l'aide d'air comprimé sur un support quelconque.

Les principales distinctions entre les deux grandes méthodes de projection – voie sèche et voie mouillée – résident dans le point d'introduction de l'eau et de l'air comprimé ainsi que dans la consistance du mélange.

Quelle que soit la méthode, la force de projection se traduit par des pertes – par rebonds et retombées – dans des proportions variables.

Cette force de projection permet le compactage et assure ainsi au béton projeté ses qualités de résistance, compacité, étanchéité, réduction du retrait et adhérence à la paroi réceptrice.

La mise en œuvre du béton projeté se fait par « couches » successives. On appelle « couche » chaque épaisseur de béton qu'on laisse faire sa prise, soit dans l'attente d'une nouvelle projection, soit parce que l'épaisseur requise est atteinte.

Chaque couche de béton projeté est elle-même réalisée par « passes ». On appelle « passe » l'épaisseur de béton frais que le porte-lance met en œuvre progressivement pour obtenir une couche. Cette méthode de projection tient à l'art du projeteur qui doit savoir comment travailler pour obtenir des couches homogènes (voir § 6.4 et 6.5).

Les épaisseurs maximales d'une couche sont fonctions de nombreux paramètres tels que l'inclinaison du support, le type de support, le mode de projection et la consistance du béton, la densité de ferrailage, etc. On se reportera pour des ordres de grandeur à ce sujet au paragraphe 2.6.

2.2 Spécificités de la méthode de projection par voie sèche

2.2.1 Mélange à consistance pulvérulente (humide ou sèche)

Dans le cas de la projection par voie sèche, le mélange a une consistance pulvérulente (sèche ou légèrement humide), l'eau est introduite à la lance, l'air comprimé est introduit dans la machine, avec éventuellement un complément à l'entrée du tuyau de transfert.

Le mélange peut être :

- fabriqué sur site avec un dispositif de contrôle du dosage des constituants (pondéral ou volumétrique), il est alors toujours humide ;
- fabriqué en centrale B.P.E, il est très généralement humide et cette humidité doit être limitée à 5% du poids sec des granulats ;
- fabriqué en usine avec un conditionnement en sacs, « Big-Bags » ou livré en vrac dans un silo de stockage sur chantier, il est alors totalement sec.

Les mélanges complètement secs sont soumis aux mêmes règles de stockage que le ciment (voir date de péremption). La durée d'utilisation des autres mélanges est la même que celles des mélanges préhumidifiés.

Préhumidification, prémouillage

Ces deux termes ne doivent pas être confondus car ils correspondent à des actions différentes, l'une intervenant avant transfert du matériau pulvérulent, l'autre assurant l'introduction de l'eau en amont de la lance.

Préhumidification des mélanges secs

On entend par « mélange préhumidifié » un mélange (ciment, sables, gravillons) dans lequel on introduit volontairement une quantité d'eau comprise entre 2 et 5 % du poids sec des granulats. Un tel mélange présente un aspect « terre humide ».

- Lorsque le mélange initial est pulvérulent totalement sec, conditionné en sacs ou en Big-Bags, sa préhumidification nécessite généralement un malaxage. Il est préférable d'introduire l'eau sous forme d'une pulvérisation dans le malaxeur, qui peut alors être un malaxeur à axe vertical, ou bien une bétonnière à tambour basculant.
- Pour les mélanges pulvérulents totalement secs livrés en vrac dans un silo, l'introduction de l'eau se fait dans la vis de vidange en partie basse du silo qui joue le rôle du malaxeur, ou le dispositif à vis d'alimentation de la machine.

Attention : il est quasi impossible de préhumidifier un mélange contenant un accélérateur ou un raidisseur en poudre car ceci impose son utilisation extrêmement rapide après préhumidification, incompatible avec des distances de transfert supérieures à 50 ou 100 m. Pour ce type de mélange, principalement utilisé pour les bétons rapides (ex : RIG¹), il est préférable d'employer une lance de pré-mouillage.

Les résultats obtenus avec la préhumidification sont les suivants :

- suppression de la poussière lors du déversement du mélange dans la machine et lors de la décompression des alvéoles d'une machine à rotor,
- diminution de la vitesse de remplissage des alvéoles du rotor et donc diminution des risques de blocages dans le coude de sortie de la machine,
- réduction de l'émission de poussières à la lance,
- amélioration de l'homogénéisation du mélange dans le flux d'air
- fort ralentissement de la vitesse d'usure des pièces en friction pour les machines à rotor.

Chaque fois que cette opération est possible, elle est fortement conseillée. Elle limite toutefois la durée possible d'utilisation du mélange préhumidifié. Cette durée dépend fortement de la température et du type

¹ RIG = Résistance Initiale Garantie, correspondant à un cahier des charges SNCF

de ciment. Elle est par exemple, pour un même ciment, de l'ordre de deux heures à 20°C et inférieure à ½ h à 30°C. Il est difficile de donner des règles générales en raison de l'influence de la chaleur d'hydratation du ciment.

Prémouillage des mélanges secs

Le prémouillage consiste à placer un anneau d'introduction de l'eau à une distance adaptée au diamètre du tuyau et en amont de l'embout de lance.

Le calcul de la distance de prémouillage est empirique et résulte des expériences acquises sur chantier par les entreprises spécialisées.

En première approximation la règle suivante est souvent utilisée :

distance de prémouillage = 20 à 30 fois le diamètre intérieur de la conduite de transfert
A titre indicatif, cette distance varie de 0,60 m à 2 m, pour un tuyau de diamètre intérieur :

Ø 32 mm	0,60 m à 0,80 m
Ø 38/40 mm	0,80 m à 1,20 m
Ø 50 mm	1,20 m à 1,50 m
Ø 65 mm	1,50 m à 2,00 m

Ce système provoquant un frottement du mélange mouillé entre le point d'introduction de l'eau et la lance entraîne certes une réduction des poussières mais aussi une diminution de la vitesse de sortie et une énergie de compactage moins importante. Cela oblige le porte-lance à augmenter la quantité d'eau.

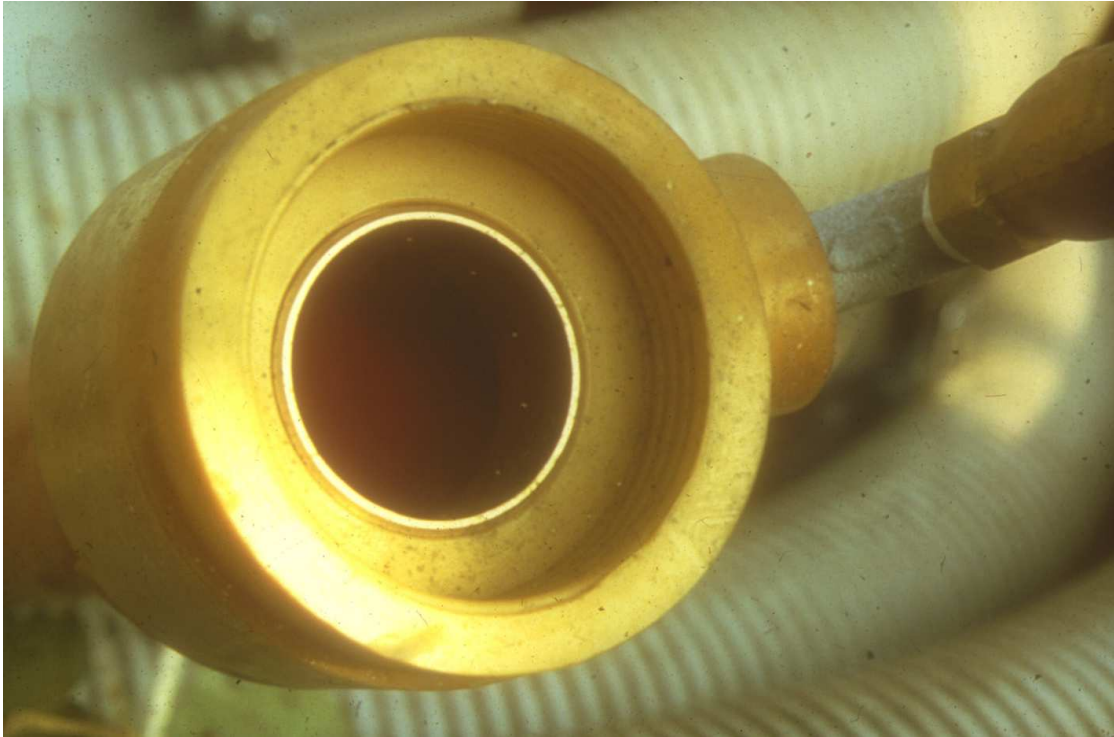
L'utilisation d'une lance de prémouillage est délicate, surtout en présence de conduite de petit diamètre (30 à 40 mm) compte tenu des risques de formation de bouchons. Elle est déconseillée pour des travaux où l'adhérence est primordiale : réparations et rénovation de structures.

Elle doit être limitée au cas de stricte nécessité, par exemple pour des travaux en espace confiné avec un mélange adjuvanté si la préhumidification est impossible à cause de la forte distance de transfert.

2.2.2 Cheminement du béton en voie sèche

Dans la méthode de projection par voie sèche, le cheminement est le suivant :

- Le mélange, sec ou légèrement humidifié, est introduit dans la machine dont le rôle est de le distribuer le plus régulièrement possible vers la conduite de transfert, après expulsion par air comprimé.
- L'air comprimé introduit en amont du dispositif de distribution de la machine – ainsi qu'un éventuel complément d'air introduit à sa sortie (si le mélange est humide et a du mal à s'écouler) – véhicule le mélange à grande vitesse dans la conduite : *Cette vitesse peut varier entre 50 et 100 m/s selon le type de machine et le débit d'air admis, le diamètre et la longueur du tuyau.*
- à l'extrémité de la conduite, la lance est munie d'une bague percée de trous permettant l'introduction de l'eau sous pression pour le mouillage du mélange *La vitesse à la sortie de la lance est importante : 100 à 150 m/s avec utilisation de lance tronconique. Elle peut au contraire être abaissée dans des proportions importantes avec un prémouillage en amont de la lance.*
- le flux d'air projette le mélange contre le support, assurant ainsi la constitution de la couche de béton et son compactage.



Anneau de mouillage

2.2.3 Constitution de la couche de béton en voie sèche

A la sortie de la lance, le béton projeté par voie sèche est constitué :

- ✓ d'air
- ✓ d'eau
- ✓ d'éléments solides : ciment, granulats et, éventuellement, fibres.

A l'arrivée sur le support, ces constituants se comportent de différentes manières : les éléments fins (eau et ciment) se fixent sur la paroi et les éléments les plus gros (sable et graviers) – dont l'énergie est importante – rebondissent.

Une pellicule de pâte d'éléments fins commence à se créer et permet, au fur et à mesure de la projection, aux gros éléments de s'incruster et de compacter le béton déjà en place. On constate encore des rebonds d'éléments ne pouvant se ficher dans le « matelas » de béton insuffisamment épais ou rebondissant contre un granulat déjà en place ou une armature.

Le martelage granulat contre granulat fournit l'énergie nécessaire au compactage et à l'incrustation des gros éléments dans la pâte.

Du fait des pertes par rebond des gros éléments ainsi que de la réduction progressive des pertes au fur et à mesure de l'augmentation d'épaisseur du béton, **la teneur en fines et en ciment varie dans l'épaisseur de la couche en place, elle est :**

- ✓ très enrichie en ciment au contact du support, ce qui assure une adhérence excellente et une bonne protection contre la corrosion des armatures lorsqu'elles ont dues être plaquées au support pour des raisons géométriques,
- ✓ moins riche en s'éloignant du support, ce qui limite retrait et fissuration.

2.2.4 Emploi d'adjuvants introduits dans la lance en voie sèche

En voie sèche l'utilisation d'adjuvants est inutile lorsque l'on met en place des couches d'épaisseur 6 à 7 cm et qu'il vaut mieux procéder par projection de plusieurs couches de béton non adjuvanté plutôt que par la projection d'une couche épaisse de béton adjuvanté.

Les adjuvants liquides sont utilisés pour modifier la formulation des mélanges afin d'améliorer la tenue sur le support, soit en présence de venues d'eau, soit pour obtenir de fortes épaisseurs de couches. Ils sont introduits à l'anneau de mouillage.

L'emploi de ces produits liquides se fait soit avec un dispositif de pompe-doseuse à réglage asservi au débit de la projection, soit en utilisant un mélange « eau + accélérateur » dans une proportion calculée à partir du dosage théorique en ciment, en tenant compte de l'humidité du mélange arrivant à la lance et d'un E/C théorique de 0,40.

Les adjuvants en poudre sont en général incorporés aux mélanges totalement secs (en sacs ou en silo) lors de sa fabrication. Cela suppose toutefois un minimum de précautions concernant la durée et les conditions de stockage. Il est déconseillé de les introduire dans la machine sans malaxage préalable, par l'intermédiaire d'un doseur asservi à la vitesse de chargement du mélange (tapis ou vis). Voir § 5.4.5.

2.2.5 Rôle et compétence du porte-lance en voie sèche

Le rôle du porte-lance est essentiel en voie sèche. De lui dépend l'obtention des critères de qualité et des caractéristiques requises pour le béton.

- Il veille à l'état de propreté du subjectile et des armatures et à un bon mouillage du support, facteurs primordiaux d'obtention de l'adhérence nécessaire à l'obtention du monolithisme, en cas de réparation ou de renforcement d'une structure en béton armé.
- Sur la base de son savoir-faire, il émet un avis sur le mélange et donne les consignes pour le réglage de la machine, le débit de mélange et le débit d'air introduit à la machine. Les constatations visuelles qui guident son appréciation concernent tout particulièrement la vitesse de constitution de la couche de béton, sa souplesse lors de l'impact et l'incrustation des gros granulats, l'état de « propreté » des armatures au passage du jet de béton.
- Il règle la distance de projection entre le support et l'extrémité de la lance.
- Il apprécie et règle la quantité d'eau à introduire à la lance à partir de l'observation de la brillance en surface du béton juste après la projection (limite mat-brillant en vertical, juste brillant en plafond).
- Il adapte l'orientation du jet de projection pour assurer un bon enrobage des armatures.
- Il maîtrise parfaitement la planimétrie et laisse après projection une surface quasi uniforme et d'aspect régulier en « grains ».
- Il refuse des conditions de travail non adaptées, que ce soit pour :
 - échafaudages de conception ou largeur inadaptées
 - défaut de préparation de la surface réceptrice
 - défaut de pose ou de fixation des armatures générant des vibrations ou des déformations sous le poids du béton.
 - conditions de livraison non adaptées (temps d'attente pour B.P.E)
 - non respect des conditions d'hygiène et de sécurité (produits, protection et ventilation), absence d'équipement individuel de protection.

Dans la démarche engagée par l'ASQUAPRO il doit être titulaire d'une qualification d'aptitude à la classe de travaux à réaliser (voir commission Qualification et Certification).

2.2.6 Récapitulatif des spécificités de la projection par voie sèche

Mélange véhiculé par flux d'air

- possibilité de distance de transfert importante
- manœuvre aisée des tuyaux (faible masse lors de la projection et tuyau vide à l'arrêt)
- faible pression dans les tuyaux

- obligation de protection des granulats contre la pluie, en particulier du sable afin de ne pas dépasser 5 à 7 % d'humidité (cette sujétion disparaît avec les mélanges secs livrés en sacs ou en silos)
- production de poussières à la machine (en particulier avec une machine à rotor), ce phénomène peut être réduit par une pré-humidification (1 à 3 % du poids total des matériaux secs).
- nécessité d'un compresseur de forte puissance (pour un même débit, besoin de 2 fois plus de puissance qu'en voie mouillée)

Vitesse élevée dans le jet

- compactage important favorisant des résistances élevées et une faible porosité
- pertes par rebond dont le coût doit être pris en compte pour l'approvisionnement du mélange et l'évacuation des pertes
- projection de granulats nécessitant le port de protections individuelles.
- mesures spécifiques de protection de l'environnement (poussières, projection de gros éléments à grande vitesse)
- risque de détérioration de support fragile

Introduction d'eau à la lance

- réglage manuel à la lance sur la base d'une appréciation visuelle par le porte lance : aspect à la limite du mat et du brillant (pas assez d'eau : production de poussière; trop d'eau : le béton trop fluide ne tient pas sur le support)
- l'eau est introduite à la lance avec une pression adaptée à la longueur de la conduite, à un éventuel dénivelé et au débit du béton (à titre indicatif il est recommandé de ne pas descendre au-dessous de 0.4 MPa avec une lance équipée d'une buse conique). Sans buse conique il est recommandé de ne pas descendre au-dessous de 0.8 MPa.

Comportement de la couche de béton

- excellente adhérence au support par enrichissement en ciment au contact du support (ne pas mettre en place un promoteur d'adhérence, voir § 3.5),
- bonne protection contre la corrosion lorsque les contraintes géométriques sont telles que l'on ne peut faire autrement que de plaquer les armatures contre le support.
- bonne cohésion du béton ne nécessitant pas d'accélérateur pour les utilisations courantes,
- en cas de projection de mélanges avec ajout de fibres, appauvrissement en fibres par rapport à la formulation initiale,
- obtention aisée de béton haute performance,
- faible teneur en eau limitant le risque de fissuration dû au retrait malgré l'enrichissement en ciment au contact du support.

Matériels de projection

- large gamme de matériels, facilement disponibles et adaptés aux différentes configurations d'ouvrages (voir § 5)

2.3 Spécificités de la méthode de projection par voie mouillée

Il existe deux méthodes de projection par voie mouillée : flux dilué et flux dense. Elles consistent toutes deux à introduire dans une machine un mélange préalablement malaxé (mouillé) qui est poussé dans la conduite de transfert par pompage mécanique (flux dense) ou propulsé par injection d'air comprimé à la sortie de la machine (flux dilué).

La méthode « **voie mouillée à flux dilué** », associant certaines propriétés de la voie sèche et de la voie mouillée, permet l'emploi de bétons non pompables, elle impose toutefois une grande distance entre la paroi et la lance, tout en provoquant presque autant de pertes et de poussières que la voie sèche.

Intéressante essentiellement en cas de consistance irrégulière du béton fourni par la centrale à béton, cette méthode n'est pas évoquée dans ce fascicule ; seule la technique de « **voie mouillée à flux dense** » est décrite ci-dessous.

2.3.1 Mélange malaxé avant projection

Dans le cas de la projection par voie mouillée, le mélange doit avoir une consistance plastique. L'eau est introduite au moment du malaxage lors de la fabrication du mélange et avant son déversement dans la machine. Pendant le transfert entre la machine et la lance, le mélange est donc mouillé comme s'il s'agissait d'un béton destiné à être pompé. L'air comprimé est introduit à la lance à l'extrémité de la conduite.

Le mélange provient généralement d'une centrale B.P.E. Occasionnellement, il peut être fabriqué sur le site par une centrale de chantier équipée d'un dispositif de dosage pondéral.

2.3.2 Cheminement du béton en voie mouillée

Dans la méthode de projection par voie mouillée à flux dense, le cheminement est le suivant :

- Le béton malaxé est déversé dans la machine. Il contient déjà la quantité d'eau nécessaire à sa mise en œuvre ainsi qu'un adjuvant assurant sa fluidité (superplastifiant).
- Il est véhiculé, à faible vitesse, jusqu'à la lance par pompage : système à pistons (le plus couramment utilisé), système à vis ou péristaltique.
- L'air comprimé est introduit à la lance, ainsi que le raidisseur (quasi obligatoire sauf pour les bétons de sable projetés en faible épaisseur). Il éclate le mélange en petites masselottes.
- Ces masselottes sont projetées contre le support par le jet d'air comprimé qui assure la mise en place du béton et son compactage. La vitesse en sortie de lance est de l'ordre de 30 m/s.

2.3.3 Constitution de la couche de béton en voie mouillée

A la sortie de la lance, le béton projeté par voie mouillée est constitué :

- ✓ d'air,
- ✓ de béton malaxé séparé en masselottes,
- ✓ d'adjuvants.

A l'arrivée sur le support, la masse de béton se reconstitue par réunion des masselottes sous l'effet conjugué du jet d'air comprimé et de l'effet « raidisseur » quasi instantané de l'adjuvant.

L'énergie de projection, plus faible qu'en voie sèche, contribue à réduire fortement les rebonds. De plus, ces derniers ont pratiquement la même composition que le mélange initial.

La composition du béton en place reste homogène dans toute l'épaisseur projetée. Toutefois la superposition de couches peut présenter un risque de feuilletage.

Le mélange tient sur le support par collage, grâce à l'adjuvant.

2.3.4 Emploi d'adjuvants à la sortie de la lance en voie mouillée

Généralement liquides, les adjuvants (raidisseurs) sont obligatoires pour assurer la tenue sur le support lorsque le béton est très fluide pour pouvoir passer dans la machine et dans la conduite. C'est le cas le plus général en France. Il est toutefois possible d'élaborer des formules qui permettent une projection sans raidisseur sur support vertical.

Les raidisseurs sont introduits au niveau de l'anneau d'introduction d'air.

Comme en voie sèche, le dosage des adjuvants se fait par pompe-doseuse asservie au débit de la machine. Toutefois, la répartition de l'adjuvant dans la masse de béton peut ne pas être parfaitement homogène.

2.3.5 Rôle et compétence du porte-lance en voie mouillée

Le terme de porte-lance est généralement inadapté en voie mouillée car l'opérateur de projection, sauf pour les bétons de sable, porte rarement la lance (très lourde). On a très souvent recours à l'emploi de robot ou bras manipulateur.

L'opérateur n'intervient pas sur la composition du béton en place (le E/C est conditionné par la formule initiale du béton malaxé).

Il doit avoir une parfaite maîtrise de la conduite du bras à l'extrémité duquel est fixée la lance dont il commande à distance la position et l'orientation par rapport au support. Il n'a pas d'action possible sur les mouvements de rotation ou de balayage de la lance.

Son rôle est particulièrement déterminant en cas de présence d'armatures ou de cintres. Leur bon enrobage est quasiment impossible à obtenir depuis la cabine de pilotage. Il est nécessaire d'utiliser le boîtier de commande à distance en se positionnant de façon à avoir une vue directe sur le point d'impact du jet de projection.

2.3.6 Récapitulatif des spécificités de la projection par voie mouillée à flux dense

Béton véhiculé par pompage

- Pas de poussières à la machine
- Pas de précaution particulière pour la protection des granulats contre l'humidité
- Teneur en eau théoriquement régulière (le porte lance ne l'influence plus) mais il reste le problème d'une présence d'eau résiduelle dans la cuve du camion de transport de béton.
- Frottement important dans la conduite : transfert sur de grandes distances difficile (environ 300 m maximum avec une composition bien adaptée et une machine de forte puissance ; nécessité de précautions particulières dès 100 m). Au-delà de 300 m, nécessité d'une étude spécifique pour vérifier la faisabilité.
- Pression importante dans les conduites : pouvant atteindre 50 à 100 bars (risque d'éclatement)
- Tuyau rempli de béton : lourd à manipuler
- Formulation exigeant une mise au point rigoureuse (plasticité, fluidité) et une régularité de la consistance

Vitesse réduite dans le jet

- peu de poussière à la lance
- peu de pertes par rebonds (économie de matériaux)
- peu de rebondissement de gros granulats, gênant le porte lance
- peu de modification de composition avant et après projection
- limitation du rayon d'impact des risques de nuisance sur l'environnement lors de la projection
- possibilité de projeter sur un support fragile ou à faible cohésion
- limitation du compactage
- adhérence au support faible (quasiment toujours inférieure à 1,5 MPa)
- enrobage délicat à l'arrière des armatures (à cause du raidisseur, mais même sans raidisseur car la vitesse du jet est faible)
- retombées contenant du ciment avec raidisseur, difficiles à évacuer.

Comportement de la couche de béton

- emploi quasi obligatoire d'un accélérateur ou d'un raidisseur (sauf pour un béton de sable projeté en faible épaisseur) dont l'emploi et le dosage ont une influence directe (\pm forte) sur la résistance finale du béton (à vérifier lors des essais de convenance),
- si nécessité de faire plusieurs passes pour obtenir une couche épaisse, attention au phénomène de feuilletage² (avec un accélérateur, en une couche, on peut mettre en place jusqu'à 30 cm de béton en piédroit et plus de 20 cm en voûte),
- dosage en fibres du béton en place proche du dosage initial,
- nécessité d'un dosage initial en ciment élevé (minimum 400 kg/m³) entraînant un retrait important,
- mise au point délicate pour la projection de béton haute performance,
- pas d'influence du porte-lance sur le dosage de l'eau.
- Empâtement des armatures créant des phénomènes d'ombre.
- Retrait deux fois plus important qu'en voie sèche (cf thèse de Sylvie Gérome en 2003)

Matériels de projection

- existence de machines puissantes permettant des débits élevés (jusqu'à 20 m³/h avec robot de projection)
- nécessité d'un compresseur d'air comprimé (mais deux fois moins puissant qu'en voie sèche à débit égal) à coupler avec la pompe à béton et parfois avec un bras robot.
- utilisation indispensable d'un stabilisateur pour permettre un temps d'utilisation suffisant du béton gâché, sinon nettoyage nécessaire à chaque arrêt de projection – au bout d'un quart d'heure en cas de température élevée...

² Le phénomène de feuilletage correspond à une mauvaise liaison entre des couches mises en place successivement. Ce phénomène intervient dès qu'on projette du béton frais sur du béton durci, qu'il soit durci naturellement ou artificiellement par un raidisseur (attention au dosage excessif ou à un temps trop long avant recouvrement). Chaque fois que l'on projette du béton frais sur du béton durci, il est toujours nécessaire de faire une préparation de surface pour éviter le feuilletage (cf § 3.4.2).

2.4 Domaines d'utilisation des deux grandes méthodes de projection

La projection par voie sèche est d'utilisation très nettement antérieure à la voie mouillée. Cette dernière n'est véritablement apparue que dans les travaux souterrains mettant en œuvre la nouvelle méthode autrichienne (années 50).

Les améliorations successives apportées aux différents matériels ont permis de limiter les écarts entre les deux méthodes. La qualité des résultats obtenus par voie sèche reste néanmoins supérieure à celle obtenue par voie mouillée (cf : thèse de Sylvie Gérôme en 2003).

La délimitation entre les différents domaines d'application varie selon les critères que l'on désire retenir : qualité du béton, facilité de mise en œuvre, expérience de l'entreprise, qualification des équipes, cadence de production, ouvrage permanents ou temporaires.

2.4.1 Domaines exclusifs de la voie sèche

Elles recouvrent les domaines où la qualité du béton, la compacité, l'adhérence et la limitation du retrait sont prépondérants :

- ✓ réparations et renforcement de structures,
- ✓ réalisation de voiles minces avec armatures,
- ✓ projection de béton réfractaire,
- ✓ rejointoiement de maçonneries à joints larges et profonds,
- ✓ protection immédiate de terrain avec activité discontinue et volume unitaire restreint (blindage de puits, de tunnel, plots alternés en soutènement, reprise en sous-œuvre).

2.4.2 Domaines où la voie sèche est prépondérante

Les possibilités de grande distance de transfert, la maniabilité des tuyaux, la compacité du béton projeté par voie sèche permettent :

- ✓ la projection en falaise,
- ✓ la réalisation de soutènements : parois clouées, parois berlinoises,
- ✓ la rénovation d'ouvrages souterrains (route, voie ferrée, exploitation minière, canal),
- ✓ la projection de béton haute performance ou R.I.G.

2.4.3 Domaines exclusifs de la voie mouillée

- ✓ travaux en espace très confiné sans possibilité de ventilation (galerie de faible section, galerie hydraulique, collecteur d'assainissement visitable),
- ✓ projection de béton de sable (renforcement en assainissement),
- ✓ nécessité de fort débit (12 m³/h ou plus)

2.4.4 Domaines où la voie mouillée est prépondérante

- ✓ projection sur support fragile (textile, coffrage carton, terrains sableux en tunnel),
- ✓ soutènement en tunnel nécessitant des cadences importantes de projection (> 6 m³/h),
- ✓ rejointoiement de maçonneries avec joints étroits (inférieur à 1 cm) ; nécessité d'une machine à débit variable en continu.



2.4.5 Domaines communs aux deux méthodes

Travaux où la résistance ≤ 25 MPa et l'adhérence $\leq 0,8$ MPa

- ✓ tunnels,
- ✓ protections de berges et de perrés,
- ✓ construction de bassins, piscines, réservoirs, habitations,
- ✓ voile de renforcement de murs en maçonneries.

2.5 Voie sèche – voie mouillée : comment choisir ?

Avant de choisir une méthode, il est utile de se poser les questions suivantes :

- Type de travaux ?
- Qualités de béton exigées ?
- Nature du support ?
- Ferrailage ?
- Géométrie de l'ouvrage et accessibilité ?
- Exigences en matière de sécurité et d'hygiène ?
- Exigences en matière de délai, de cadence de production, de débit instantané ?

L'influence des réponses à ces questions fait l'objet des paragraphes suivants. Il est fréquent d'être confronté à des contradictions et le choix final nécessitera souvent de préciser les facteurs prioritaires.

Les réponses sont formulées avec VS pour voie sèche, VM pour voie mouillée

2.5.1 Influence du type de travaux

Les travaux rentrent-ils dans une catégorie pour laquelle l'une ou l'autre des méthodes est quasi imposée ? Voir paragraphe ci-dessus.

2.5.2 Influence des qualités exigées pour le béton

- Compacité élevée : VS

- Forte adhérence au support : VS
- Forte résistance à 7 et 28 jours : VS plutôt que VM
- Résistance aux jeunes âges : VS en attendant évolution technologique VM
- Durcissement rapide pour application de couche épaisse : VS ou VM
- Durabilité élevée : VS plutôt que VM
- Résistance au gel-dégel : VS
- Limitation de la fissuration de retrait : VS

2.5.3 Influence de la nature du support

- paroi ou support rigide (naturelle ou artificielle) : VS ou VM
- support souple ou déformable, fragile : VM plutôt que VS
- paroi susceptible d'être le siège de venues d'eau : VS plutôt que VM

2.5.4 Influence du ferrailage

- faible densité de ferrailage : VS ou VM
- densité élevée de ferrailage : VS
- incorporation de fibres dans le mélange : VS ou VM mais pertes élevées en VS nécessitant des exigences accrues sur les fibres employées.

2.5.5 Influence de la géométrie de l'ouvrage et de son accessibilité

- grande distance entre point de projection et chargement de la machine : plutôt VS dès que distance > à 100 m ; VS si distance > à 300 m
- altitude de la zone à projeter par rapport à celle de la machine : plutôt VS que VM au-delà de 20 m de dénivelée (sinon nécessité de matériels spécifiques)
- travaux sur échafaudage ou nacelle : VS (poids élevé du tuyau plein en VM)
- impossibilité d'installation des matériels à proximité immédiate du lieu de projection : VS plutôt que VM dès que distance > 100 m
- contrainte de gabarit des matériels : machines VS plus petites que VM

2.5.6 Influence des sujétions en matière d'hygiène et de sécurité

- milieu ouvert : VS ou VM
- milieu confiné : VM ou VS avec dispositif de captage des poussières à la projection.
- Se reporter au fascicule « recommandations pour l'hygiène et la sécurité » (sur le site ASQUAPRO www.asquapro.asso.fr)

2.5.7 Influence des exigences en matière de délai, de production et de débit

- soutènement immédiat de tunnels de grande section avec volume de projection important : VM avec robot
- projection incorporée dans un cycle limitant les quantités unitaires de travaux, par exemple : blindage de tunnel, de puits, travaux de soutènement par plots alternés, paroi clouée ou berlinoise : plutôt VS

- travaux en petite galeries : VM (béton de sable)

2.6 Voie sèche – voie mouillée : quelles épaisseurs maximales ?

Le principe de mise en place et de constitution de la couche fait appel à la cohésion du béton frais. Dans tous les cas, le rapport cohésion/poids du béton doit être en faveur de la cohésion. C'est ce qui conduit aux règles énoncées ci-après.

2.6.1 Voie sèche

Pour une formulation sans adjuvant raidisseur, il est admis :

Projection sur surface verticale : l'épaisseur de la couche est limitée à 15 cm. Au-delà il y a fluage du béton frais sous son poids propre.

Projection en plafond : sur support fixe, l'épaisseur de la couche est limitée à 4 cm. Au-delà il y a sollicitation de la cohésion, sans forcément chute du béton mais cela nuit à sa résistance. En cas de vibration du support (par exemple sous-face de dalle sous circulation), l'épaisseur en plafond est limitée à 3 cm.

L'étude d'une formulation avec adjuvant raidisseur ou accélérateur peut permettre d'augmenter ces limites d'épaisseur.

Les adjuvants alcalins à base d'aluminates ou de silicates de sodium ne doivent pas être utilisés (penser à les interdire explicitement dans les C.C.T.P). Ils présentent des risques importants pour la santé des utilisateurs et pour l'environnement ; ils réduisent fortement les résistances du béton à moyen et long terme ; ils apportent des alcalins supplémentaires (bilan des alcalins vis-à-vis de l'alcali-réaction). On doit utiliser exclusivement des adjuvants non-alcalins.

Quelque soit la nature et le type de l'adjuvant, son efficacité est directement liée à la température du support et de l'air lors de la projection. Il est admis que pour une température inférieure à 15°C, l'efficacité des adjuvants et raidisseurs est fortement diminuée. En fonction de la température, il est proposé de retenir les règles suivantes :

- | | |
|--|---|
| Si $T > 25^{\circ}\text{C}$ - | L'épaisseur sur surface verticale est limitée à 25 cm.
L'épaisseur en plafond est limitée à 12 cm. |
| Si $20^{\circ}\text{C} > T > 25^{\circ}\text{C}$ - | L'épaisseur sur surface verticale est limitée à 20 cm.
L'épaisseur en plafond est limitée à 8 cm. |
| Si $15^{\circ}\text{C} > T > 20^{\circ}\text{C}$ - | L'épaisseur sur surface verticale est limitée à 15 cm.
L'épaisseur en plafond est limitée à 6 cm. |
| Si $T < 15^{\circ}\text{C}$ - | L'épaisseur sur surface verticale est limitée à 15 cm.
L'épaisseur en plafond est limitée à 5 cm. |

2.6.2 Voie mouillée

On peut, là aussi, utiliser une formulation avec ou sans adjuvant raidisseur ou accélérateur. On doit également utiliser exclusivement des produits non-alcalins.

Les valeurs limites d'épaisseur sont identiques à celles indiquées en voie sèche dans les mêmes conditions.