Chapitre 4

Bétons avec mise en œuvre particulière

4.1 Béton pompé **130**
4.1.1 Introduction 130
4.1.2 Exigences normatives 131
4.1.3 Technologie du béton 131
4.1.4 Recommandations pour le pompage du béton 133

4.2 Béton projeté **134**
4.2.1 Introduction 134
4.2.2 Exigences normatives 136
4.2.3 Technologie du béton 137
4.2.4 Recommandations pour la planification du béton projeté 139

4.3 Béton autoplaçant **141**
4.3.1 Introduction 141
4.3.2 Exigences normatives 141
4.3.3 Technologie du béton 143
4.3.4 Recommandations pour la planification du béton autoplaçant 147

4.4 Monobéton **150**
4.4.1 Introduction 150
4.4.2 Exigences normatives 150
4.4.3 Technologie du béton 151
4.4.4 Recommandations pour la planification du monobéton 152

4.1 Béton pompé

4.1.1 Introduction

Le pompage du béton a fait ses preuves durant les dernières décennies comme un moyen moderne et économique de mise en place. Un béton frais est apte au pompage, si sa consistance permet un transport à l'aide d'une pompe, tout en restant homogène pendant le processus de pompage. Le béton pompé se prête au bétonnage de tous les éléments de construction, en particulier lorsqu'une cadence élevée de bétonnage est exigée ou en cas d'accès difficile au lieu du bétonnage. Le pompage du béton offre les avantages suivants:

- une mise en place rapide (selon la section de l'élément entre 30 à 150 m³/heure, normalement env. 90 m³/heure)
- il ne nécessite pas de grue, respectivement la grue peut être occupée à d'autres travaux
- une mise en place aussi possible en cas d'ouvrages difficilement accessibles, p. ex. des éléments couverts, des tunnels
- une mise en place aisée pour l'équipe de bétonnage
- un remplissage propre du coffrage
- il permet d'opérer à de grandes distances, malgré des différences de hauteur importantes, jusqu'au lieu du bétonnage (distance de transport jusqu'à 2000 m et différence de hauteur jusqu'à 500 m)
- la mise en place continue et rapide favorise la qualité, les couches de bétonnage sont moins visibles grâce à une mise en œuvre plus rapide
- pour un mur, il permet d'éviter de grandes hauteurs de déversement du béton par l'introduction du tuyau de pompage au fond du coffrage.

Le pompage s'est imposé comme le moyen le plus rapide de transbordement du béton en comparaison avec la brouette ou la benne. La figure 4.1.1 donne de manière exemplaire les temps de transbordement pour 8 m³ de béton prêt à l'emploi. Grâce au pompage, le béton peut être mis en place avant qu'il raidisse sensiblement. Ceci se répercute positivement sur la qualité du béton, notamment pour le béton de parement et les bétons à hautes exigences de durabilité.

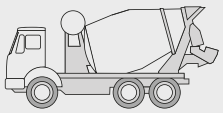
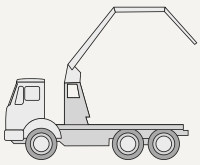
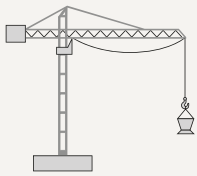
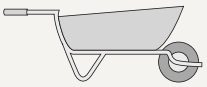
	Déversement de 8 m³ de béton	
	pompe 30 m³/h	3 personnes
	durée de déchargement 12 min	
	grue 6 m³/h avec une benne de 200 l et 2 min de transport	5 personnes
	durée de déchargement 60 min	
	brouette 3 m³/h avec 6 brouettes à 50 l et 6 min de transport	7 personnes
	durée de déchargement 120 min	

Fig. 4.1.1: Ordres de grandeur du temps nécessaire au déchargement de 8 m³ de béton en fonction des différentes méthodes de transbordement.

Dans la pratique, on distingue les pompes mobiles des pompes stationnaires (fig. 4.1.2 et 4.1.3). Lorsque la distance de transport et/ou le volume de béton sont peu importants, on peut aussi recourir à un camion malaxeur pompe.

Fig. 4.1.2: Bétonnage d'un radier à l'aide d'une pompe mobile, alimentée par camions malaxeurs.

Fig. 4.1.3: Transbordement du béton à l'aide d'une pompe stationnaire (sur remorque) avec un tuyau de pompage fixe, alimentée par camions malaxeurs.

4.1.2 Exigences normatives

Le béton pompé doit remplir, comme le béton mis en place à la grue, les exigences de base de la norme SN EN 206-1. L'aptitude au pompage «béton pompé» doit être spécifiée comme exigence complémentaire.

4.1.3 Technologie du béton

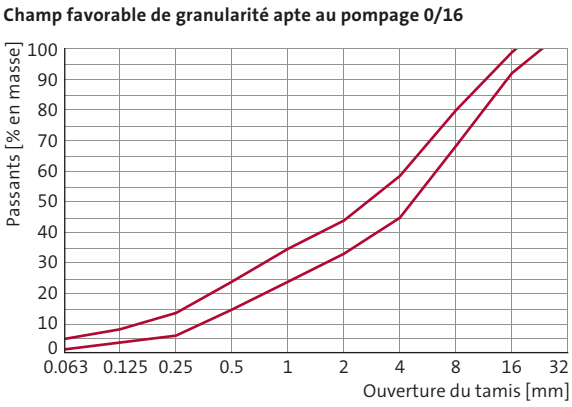
Ciment
Tout ciment admis par la norme SN EN 206-1 convient en principe pour la production de béton pompé.

Granulat
Granularité
La distribution granulométrique du granulat doit être choisie de manière à ce que la courbe granulométrique soit la plus continue possible. Le granulat doit, non seulement posséder une granularité continue, mais aussi permettre une teneur suffisamment élevée en mortier fin. Les variations granulométriques, notamment de la classe granulaire 0/4 mm (sable), sont souvent à l'origine des difficultés de pompage. La classe granulaire 4/8 mm doit être limitée au maximum à 10 % (fig. 4.1.4).

Forme des grains
Les formulations de béton avec du granulat concassé exigent une teneur plus élevée en pâte de ciment et une pression de pompage plus élevée.

Diamètre maximal du granulat
En première approche, on applique la règle suivante: le diamètre du tuyau de pompage doit correspondre au moins au triple du diamètre maximal du granulat. Si l'on pompe un béton contenant un granulat concassé avec un D_{max} = 32 mm dans un tuyau d'un diamètre de 100 mm, la teneur en grains supérieurs au diamètre maximal ne devrait pas excéder 5 % de la masse.

Teneur en farine et volume du mortier fin
La teneur en farine et le volume du mortier fin représentent des grandeurs indicatives importantes de la technologie du béton pompé. Le mortier fin est constitué des farines, d'eau, des éventuels adjuvants et du granulat < 2 mm. Il est un facteur important dans la formulation du béton pompé. Il doit enrober complètement tous les gravillons, afin d'assurer la couche de lubrification indispensable de la paroi du tuyau de pompage (fig. 4.1.5). Si le volume de mortier fin est trop petit, la pression de pompage n'est pas transmise par le mortier, mais surtout



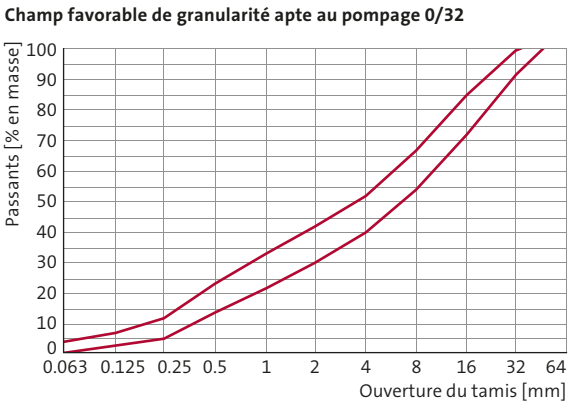


Fig. 4.1.4: Courbes granulométriques pour béton pompé avec D_{max} = 16 mm (gauche) et D_{max} = 32 mm (droite). Les granularités ayant fait leurs preuves se situent dans le champ délimité par les courbes rouges (échelle logarithmique).

par le contact entre les granulats. Il en résulte une pression transversale surélevée à cause de l'effet de cale des gros grains, qui sera encore renforcée par le frottement. Un tel béton montre une grande résistance au pompage, il ne se laissera que difficilement pomper ou provoquera des bourrages. La rentabilité du pompage en sera affectée. Un béton apte au pompage doit présenter une bonne cohésion et un bon pouvoir de rétention d'eau. Ceci permet d'éviter des ségrégations du béton dans la pompe, notamment lors des interruptions de pompage.

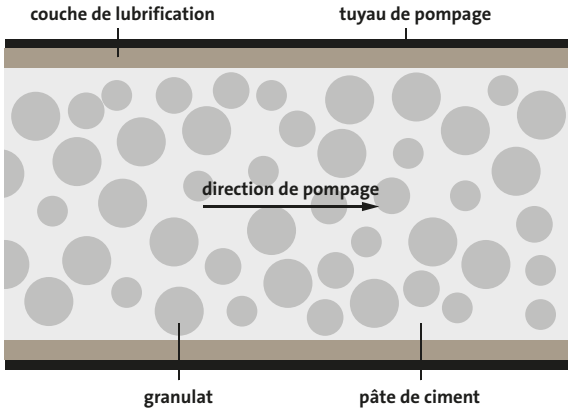


Fig. 4.1.5: Couche de lubrification entre le béton et la face interne du tuyau de pompage.

Pour contrôler l'aptitude suffisante au pompage, on doit prendre en considération la teneur en farine ainsi que le dosage en ciment et finalement le volume de mortier fin. Le tableau 4.1.1 présente des valeurs indicatives pour des bétons pompés avec un granulat roulé. En cas d'utilisation d'un granulat en majeure partie concassé, ces valeurs sont à augmenter d'au moins 10 %.

Tab. 4.1.1: Valeurs indicatives de la teneur en farine et du volume de mortier fin pour des bétons pompés avec un granulat essentiellement roulé en fonction de son diamètre maximal.

Diamètre maximal du granulat [mm]	Teneur en farine* [kg/m³]	Volume de mortier fin** [l/m³]
8	475–525	700–750
16	400–450	575–625
32	350–400	500–550

* masse de ciment, additions et granulats ≤ 0.125 mm
** volume de ciment, additions, granulats ≤ 2 mm, eau, adjuvants et air

Additions
Parmi toutes les additions, la cendre volante est la plus appropriée. Grâce à sa forme sphérique, elle influence positivement l'aptitude au pompage des bétons qui peut être améliorée par un dosage de 30 à 50 kg/m³. De plus, elle est caractérisée par une faible demande en eau. En cas d'utilisation d'un granulat essentiellement concassé, elle est employée en complément pour ajuster la granularité (augmentation de la teneur en granulat fin).

Adjuvants
En règle générale, l'emploi de fluidifiant est nécessaire pour obtenir une consistance adéquate du béton pompé.

Pour améliorer l'aptitude au pompage, on peut recourir à ce que l'on appelle des aides de pompage, qui améliorent la consistance du béton frais, réduisent le ressuage et empêchent la ségrégation. Les aides de pompage ne peuvent pas se substituer à une optimisation de la formulation du béton en vue de réduire la teneur en farine et le volume de mortier fin qui restent indispensables.

Ouvrabilité et consistance
Le pompage d'un béton à consistance raide nécessite une plus haute pression pour garantir le refoulement qu'un béton à consistance plastique. De ce fait, les bétons à consistance ferme ou plastique se prêtent mieux au pompage. En cas d'emploi de bétons à consistance plastique, il faut s'assurer qu'ils possèdent un volume de mortier fin assez grand pour une stabilité et une cohésion suffisante et qu'ils ne montrent pas de tendance à la ségrégation. Ceci peut conduire à des bouchons dans les tuyaux de pompage. Par conséquent, la consistance recommandée pour des bétons pompés correspond à un étalement entre 420 mm et 480 mm (F3) et alternativement, bien que les méthodes de mesures soient moins adaptées, à un indice de serrage selon Walz entre 1.10 et 1.04 (C3). Les bétons autoplaçants (BAP) sont toujours aptes à être pompés.

Mise en place et compactage
Démarrage du pompage
La lubrification de la face interne du tuyau exige une certaine quantité de pâte de ciment. Au moment du démarrage du pompage, cette pâte de ciment est soustraite au béton qui passe en premier par le tuyau. Pour cette raison, le pompage du béton doit être précédé de l'envoi d'une gâchée de lubrification enrichie en pâte de ciment. Les gâchées de lubrification sont de plus en plus rarement fabriquées sur le chantier, mais commandées à la centrale à béton. Pour une distance de pompage de 100 m, une gâchée de 500 litres suffit normalement de lubrification. Elle est composée de deux parts de ciment pour une part de sable et une part d'eau. L'emploi d'un retardateur est recommandé lorsque de longues durées d'ouvrabilité sont exigées. Une plus grande quantité de gâchée de lubrification est à choisir en fonction du diamètre des

tuyaux et pour des distances de pompage plus grandes (tab. 4.1.2). La gâchée de lubrification (env. 0.5 m^3) ne doit en aucun cas être utilisée pour des éléments porteurs et doit être éliminée correctement.

	Volume de gâchée de lubrification [l]	
Longueur du tuyau de pompage [m]	**Diamètre du tuyau de pompage 100/125 [mm]**	**Diamètre du tuyau de pompage 150/180 [mm]**
200	500	750
400	1000	1500
600	1500	2000

Tab. 4.1.2: Volume de gâchée de lubrification recommandé en fonction du diamètre du tuyau et de la distance de pompage.

Pompage des bétons spéciaux

Bétons fibrés

L'addition de fibres réduit de manière générale l'ouvrabilité du béton. Les fibres polymères (fibres PP ou PVA) diminuent, même en petites quantités (1 à 2 kg/m^3), la consistance du béton. Les fibres en acier (30 à 50 kg/m^3) n'ont qu'une faible influence sur la consistance du béton, mais peuvent provoquer des bourrages à l'endroit des changements de diamètre ou des coudes dans la tuyauterie. La perte de consistance due aux fibres peut être compensée par une augmentation de la pâte de ciment. En gardant constant le rapport E/C, p. ex. à 0.50, et la teneur en sable, on peut augmenter le volume de pâte de ciment de 17 l/m^3 par un ajout de 20 kg de ciment et 10 litres d'eau. Dans la pratique, une augmentation seule de la teneur en sable s'est avérée peu efficace. La durée de malaxage doit être prolongée à 120 secondes en cas d'ajout de fibres.

Béton léger

En règle générale il est possible de pomper des bétons légers avec une masse volumique supérieure à 1600 kg/m^3. Des essais préliminaires sont recommandés.

Béton à air entraîné

Une teneur en air entraîné > 5 % vol. peut diminuer les performances de la pompe sur de longues distances de pompage. Selon la distance et la hauteur de transport, la pression de pompage peut s'élever pour de courts moments à 150 bar, induisant une compression des pores d'air dans le béton frais. Le pompage influence non seulement la teneur et la distribution des pores d'air, mais aussi l'ouvrabilité. Le contrôle du béton frais d'un béton à air entraîné doit toujours se faire après le pompage. La perte des pores d'air par le pompage peut atteindre 0.5 à 2 % vol. et doit être compensée par un dosage corrigé de l'entraîneur d'air.

4.1.4 Recommandations pour le pompage du béton

Généralités

Pour garantir un pompage rentable du béton, il faut observer les indications suivantes:

- pour que l'opération de pompage se déroule de manière coordonnée et sans problème, un contact doit être établi suffisamment tôt entre l'entreprise de construction, l'entreprise de pompage et le fournisseur du béton.
- la fréquence des livraisons du béton et les performances de la pompe doivent être adaptées au rythme de mise en place par l'équipe de bétonnage.
- le transport du béton jusqu'à la pompe doit être effectué par camion malaxeur afin d'éviter tout risque de ségrégation.

Aspects de sécurité lors de l'emploi des pompes à béton

Le transport et la mise en place du béton pompé comporte des risques. Pour y pallier, il faut, en particulier, vérifier les points suivants:

- une pression plus élevée du béton pompé sur les coffrages verticaux doit être prise en compte
- aucune ligne électrique aérienne ne traverse l'espace de travail.
- la surface de l'emplacement prévu pour la pompe est suffisamment grande pour que les stabilisateurs de la pompe à béton puissent être déployés complètement (danger de basculement)
- la capacité portante de l'emplacement de la pompe et ses accessoires est suffisante.

4.2 Béton projeté

4.2.1 Introduction

L'appellation «béton projeté» se réfère à un procédé de mise en œuvre qui consiste à amener le béton sous pression dans un tuyau ou une conduite étanche jusqu'au lieu de mise en place où il est projeté violemment contre la surface d'application. Le béton se compacte de lui-même grâce à l'effet d'impact (énergie de compactage). Lors de l'impact du béton contre la surface d'application, une partie du matériau projeté rebondit et tombe, cette partie est appelée rebond ou refus. Le béton projeté se distingue par différents avantages:

- une application dans toutes les directions grâce à la bonne adhésion instantanée sur le substrat du béton projeté sous haute pression (accrochage)
- il est applicable sur toutes les aspérités du support
- une épaisseur de couche absolument libre en fonction des conditions locales
- un bétonnage sans coffrage
- une exécution possible aussi en tant que béton projeté armé (barres, fibres d'armatures)
- un effet de voile porteur rapidement atteignable sans coffrage et immédiat.

Il existe deux méthodes de mise en œuvre du béton projeté: par voie sèche et par voie humide (fig. 4.2.1 et tab. 4.2.1). Elles se distinguent par la composition du mélange et le type de machine à projeter. Dans le procédé de projection par voie sèche, le mélange introduit dans la machine est sec et l'eau de gâchage est ajoutée au niveau de la buse de projection, le cas échéant avec un accélérateur de prise. Dans le procédé par voie humide, l'eau de gâchage est incorporée au mélange dès le départ. Pour obtenir la pression nécessaire, le mélange est additionné d'air comprimé à la sortie de la buse.

Le béton projeté par voie humide est employé lorsque de hautes qualités de béton durci et un fort rendement de projection sont exigés.

Les avantages du procédé de projection par voie humide se manifestent surtout dans:

- l'augmentation du rendement de la projection, dans des cas particuliers jusqu'à 25 m³/h
- la réduction de 2 à 4 fois de la quantité de rebond
- l'amélioration nette des conditions de travail grâce à la réduction des émissions de poussières
- la baisse des coûts liés à l'usure de la machine à projeter
- la réduction du besoin en air comprimé lors de la projection
- l'amélioration des propriétés mécaniques et de durabilité grâce à un dosage contrôlé de l'eau de gâchage

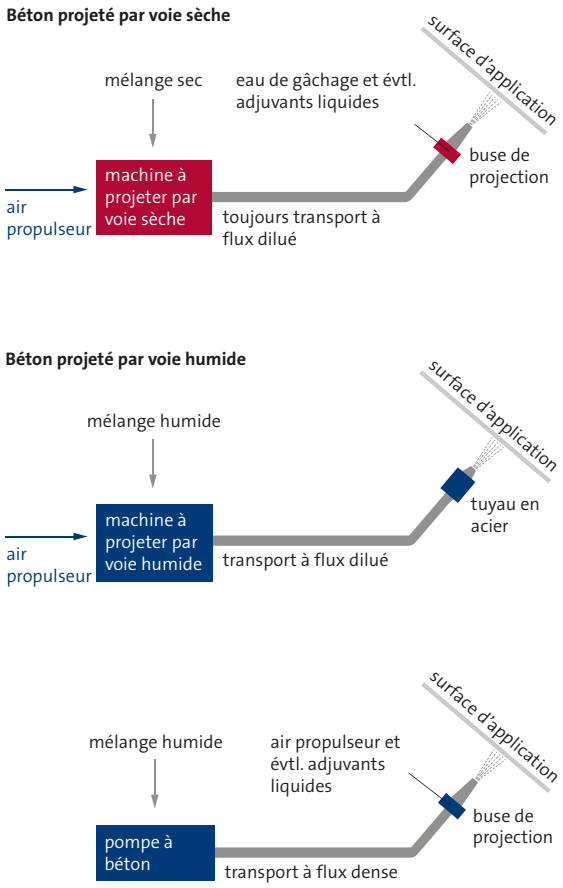


Fig. 4.2.1: Procédés de projection du béton.

Fig. 4.2.2: Mise en œuvre du béton projeté au moyen d'un robot de projection.

Fig. 4.2.3: Béton projeté par voie sèche pour la consolidation d'une fouille.

Tab. 4.2.1: Détails des procédés de projection par voie sèche et humide.

Procédé par voie	Sèche	Humide
Teneur en eau des granulats	< 5 % en masse	sans exigences
Diamètre maximal	8 (max. 16) mm	
Ciment	ciment selon SN EN 197-1	
Dosage en ciment	350 kg/m³	425 kg/m³
Début de prise sans accélérateur	> 120 minutes	
Ajout séparé d'un accélérateur à la buse	oui	
Lieu de fabrication du mélange	centrale à béton ou mélange sec	centrale à béton
Type de machine de projection	rotor (pneumatique)	pompe à béton (hydraulique)
Teneur en eau du mélange	< 4 % en masse, terre humide	humide
Principe de transport	à flux dilué (transport par flux d'air comprimé)	à flux dense (transport par pression de pompage) / à flux dilué (transport par flux d'air comprimé)

Le procédé de projection par voie sèche est toujours choisi en cas de petites quantités et de faible rendement nécessaire, mais d'exigences maximales et indispensables quant à la résistance au jeune âge, p. ex. pour des étanchéités provisoires en cas de fortes venues d'eau. Les champs d'application principaux du béton projeté par voie sèche sont, entre autres, les remises en état des ouvrages en béton, les travaux d'étanchéité, les travaux de consolidation préliminaire (en cas d'importantes venues d'eau) ainsi que pour les travaux mineurs de projection (mélange stocké en silo sur place).

Les avantages du béton projeté par voie sèche résident surtout dans:

- une haute flexibilité
- un concept logistique indépendant du temps
- des résistances au jeune âge maximales
- une disponibilité quasi illimitée du matériau stocké en silo
- pas de reste de béton

Les grandes quantités de rebond, les émissions de poussière et les coûts plus élevés liés à l'usure de l'équipement diminuent la rentabilité du procédé de projection par voie sèche.

4.2.2 Exigences normatives

Spécifications

En principe, la norme SN EN 206-1 et les normes produits associées des composants ciment, additions, granulats et adjuvants sont à respecter, ainsi que les essais qu'elles préconisent tant qu'ils sont applicables au béton projeté. Selon le champ d'application, des normes supplémentaires priment sur la norme SN EN 14487-1 relative au béton projeté (tab. 4.2.2).

Tab. 4.2.2: Bases normatives spécifiques au béton projeté.

Norme	Désignation
SN EN 14487-1	Béton projeté – Partie 1: Définitions, spécifications et conformité
SN EN 14487-2	Béton projeté – Partie 2: Exécution
SIA 198	Constructions souterraines – Exécution (travaux souterrains, soutènement)
SIA 269/2	Maintenance des structures porteuses – structures en béton (remise en état et renforcement des ouvrages en béton, structures souterraines)

Il est recommandé de spécifier le béton projeté comme béton à propriétés spécifiées. Les exigences de la norme SN EN 206-1, éléments nationaux inclus, s'appliquent à l'exception du dosage minimal en ciment. Pour les classes d'exposition, la norme SIA 198 règle, pour les constructions souterraines, l'attribution de classes de béton projeté (tab. 4.2.3). Le béton projeté pour la maintenance des constructions est réglementé par la norme SIA 269/2.

Pour la spécification du béton projeté à propriétés spécifiées, les exigences de base sont à définir de manière analogue au béton courant. La classe de consistance sera définie pour le béton projeté par voie humide. D'autres exigences complémentaires spécifiques au béton projeté peuvent être définies (tab. 4.2.4).

Contrôle

Le contrôle du respect des exigences des propriétés du béton durci se fait normalement sur des carottes. La résistance au jeune âge est mesurée sur place, soit par la méthode de pénétration d'une aiguille ou la méthode du clou à tête filetée selon la gamme de résistance attendue (tab. 4.2.5).

On distingue trois classes de résistance initiale J_1, J_2 et J_3 pour décrire le développement de la résistance du béton projeté jeune durant les 24 premières heures (fig. 4.2.4). Ces classes de résistance initiale sont attribuables à différents domaines d'application (tab. 4.2.6).

Exigences	Norme d'essai
Résistance au jeune âge	SN EN 14488-2
Profondeur de pénétration d'eau sous pression	SN EN 12390-8
Perméabilité à l'eau	SIA 262/1, annexe A
Comportement au feu	définition spécifique au projet
Adhérence par traction directe	SN EN 1542
Résistance à la flexion	SN EN 14488-3
Capacité d'absorption d'énergie (pour béton projeté armé avec fibres)	SN EN 14488-5 ou SIA 162/6 annexe 1

Tab. 4.2.4: Exigences complémentaires spécifiques au béton projeté et les normes d'essais correspondantes.

Méthode d'essai	Moment de l'essai après la projection [h]	Plage de résistance au moment de la mesure [N/mm²]
Méthode de pénétration d'une aiguille selon SN EN 14488-2	0–1	0.2–1.2
Méthode d'enfoncement d'un clou fileté selon SN EN 14488-2	1–16	3–16
Résistance à la compression sur carottes à diamètre et hauteur de 50 mm selon SN EN 12504-1	> 16	> 10

Tab. 4.2.5: Aperçu des méthodes de mesure de la résistance au jeune âge.

Tab. 4.2.3: Exigences relatives au béton projeté et champs d'application recommandés pour les constructions souterraines selon la norme SIA 198.

	Classes de béton projeté						
Propriétés	**SC1**	**SC2**	**SC3**	**SC4**	**SC5**	**SC6**	**SC7**
Classes de béton projeté	C16/20	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Classe d'exposition	X0	X0	XA1, XD1	XA1, XD1	XA2, XD1	XA1, XD1, XC3, XF3	XA1, XD3, XC3, XF3
Diamètre max. du granulat [mm]	16	16	16	16	16	16	16
Classe de teneur en chlorures	Cl 1.0	Cl 1.0	Cl 1.0	Cl 0.2	Cl 0.2	Cl 0.2	Cl 0.2

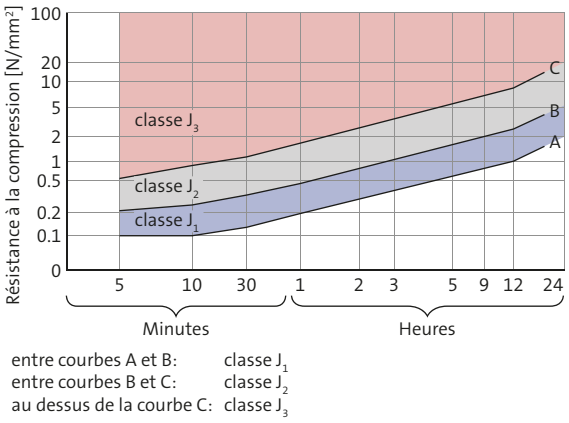


Fig. 4.2.4: Classes de résistance du béton projeté au jeune âge selon SN EN 14487-1.

Classe	Domaine d'application
J_1	Réalisation de couches minces sur un support sec, sans exigences statiques particulières. Il ne génère que peu de poussière et de refus.
J_2	Réalisation de couches épaisses mises en place à une cadence élevée (également vers le haut), ainsi qu'en cas de faibles venues d'eau et de sollicitations dues à des travaux suivant immédiatement la projection, p. ex. le forage de trous d'ancrage, le fonçage de lances, des minages provoquant des ébranlements, sollicitations subites, p. ex. par poussée du massif.
J_3	Application qu'en cas justifié, p. ex. de venues d'eau importantes ou d'un support instable, puisqu'il faut compter avec des émissions accrues de poussière et une augmentation du refus.

Tab. 4.2.6: Domaines d'application des classes de résistance du béton projeté selon la norme SN EN 14487-1.

4.2.3 Technologie du béton

Ciment

Il est primordial de choisir pour un béton projeté des ciments d'une grande finesse et avec un développement rapide de la résistance, comme p. ex. le Robusto 4R-S. La classe de résistance du ciment devrait être de 42,5 ou supérieure. Selon le procédé de projection, le dosage en ciment du béton varie entre 300 kg/m³ et 450 kg/m³.

Granulat

La granularité doit correspondre à une courbe granulométrique continue. La figure 4.2.6 montre l'exemple d'une courbe granulométrique pour un béton projeté avec D_{max} = 8 mm. Une forte proportion de gros grains a un effet néfaste sur le refus. Le diamètre maximal du granulat doit être limité à un tiers du diamètre du tuyau de transport. Un granulat naturellement roulé provoque moins d'usure de l'équipement (buse, tuyauterie) qu'un granulat concassé.

Grave 0/8 mm pour béton projeté, catégorie G_A85

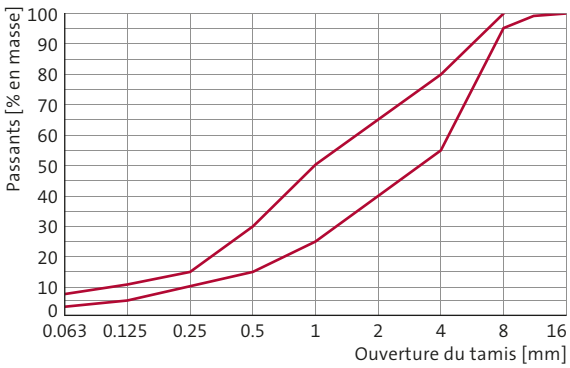


Fig. 4.2.6: Courbes granulométriques pour béton projeté avec D_{max} = 8 mm. Les granularités ayant fait leurs preuves se situent dans le champ délimité par les courbes rouges (échelle logarithmique).

Fig. 4.2.5: Coque en béton projeté. (Source: Simone Mengani, Chiasso).

La teneur en farine pour un béton projeté D_{max} = 8 mm doit se situer entre 450 kg/m³ et 500 kg/m³ pour obtenir des conditions optimales d'ouvrabilité, de cohésion et de résistance initiale (champ rose à la figure 4.2.7).

Adjuvants

Une prise rapide est indispensable pour un béton projeté. De ce fait, on a recours aux accélérateurs de prise pour diminuer le temps de passage de l'état plastique à l'état solide (voir aussi chapitre 1.4). Les accélérateurs de prise permettent d'appliquer plus rapidement des couches plus épaisses (env. 10 à 15 cm vers le haut). Le dosage prescrit de l'accélérateur doit être vérifié au moyen d'un essai de rendement.

Pour des raisons d'hygiène et de sécurité de travail, seuls les accélérateurs de prise sans alcalins sont permis en

Suisse pour les bétons projetés. L'effet des accélérateurs sans alcalins, essentiellement à base d'aluminates, repose sur deux réactions chimiques, qui se recoupent dans le temps et s'influencent mutuellement (voir chapitre 2.1.2):

- la réaction des aluminates due à l'addition de l'accélérateur (réaction du C_3A)
- la réaction des silicates du ciment (réaction C_3S)

La figure 4.2.8 illustre schématiquement le développement au cours du temps de la résistance à la compression d'un béton projeté accéléré ainsi que les différentes phases des réactions chimiques.

En plus des accélérateurs, on emploie aussi des fluidifiants, stabilisateurs et aides de pompage pour le béton projeté par voie humide. La température du béton doit être supérieure à 15° C.

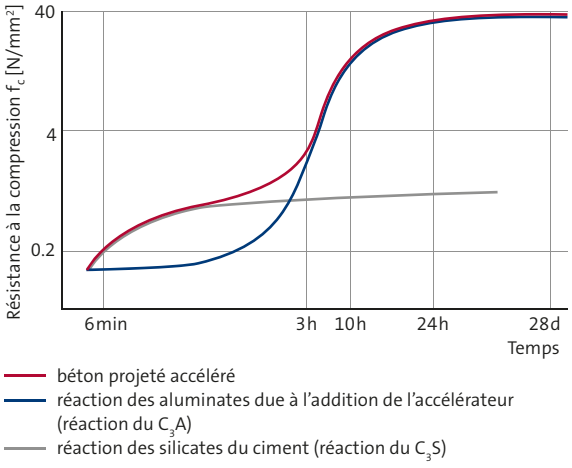


Fig. 4.2.8: Développement de la résistance à la compression d'un béton projeté accéléré. (Source: Sika Suisse SA, Zurich).

Additions

Parmi toutes les additions admises, la fumée de silice est la plus efficace, puisqu'elle améliore autant les propriétés du béton frais et que celles du béton durci. L'addition de fumée de silice (voir chap. 1.5) au béton projeté conduit à:

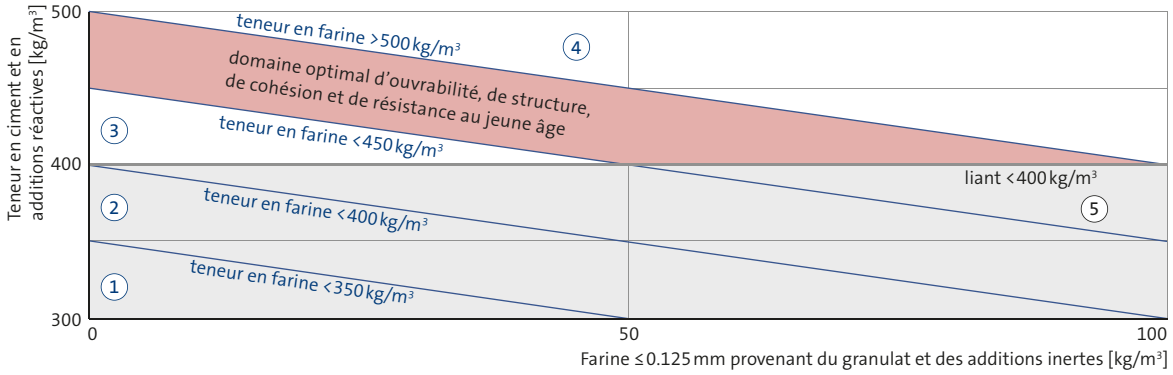
- un refus et des émissions de poussières moindres grâce à son caractère collant
- une aptitude au pompage améliorée
- une résistance mécanique plus élevée
- une densité microstructurale plus élevée, d'où une meilleure résistance vis-à-vis des infiltrations de solutions agressives
- une haute durabilité (p. ex. résistance au gel/dégel en présence de sel de déverglaçage, résistance aux sulfates)

Pour augmenter la capacité portante du béton projeté, des fibres polymères ou en acier sont ajoutées. Le plus souvent, on a recours à des fibres en acier, qui augmentent surtout la résistance à la traction et la capacité d'absorption d'énergie.

Rapport E/C

Comme dans le béton courant, le rapport E/C a une influence décisive sur la résistance et la durabilité. La valeur varie entre 0.45 et 0.55 pour le béton projeté par voie sèche et dépend de l'estimation subjective de la personne qui manipule la buse. Dans le cas du procédé de projection par voie humide, le rapport E/C est plus facilement contrôlable. Les rapports E/C habituels se situent entre 0.40 et 0.55.

Fig. 4.2.7: Influence de la teneur en farine sur les propriétés d'un béton projeté D_{max} = 8 mm. (Source: Sika Suisse SA, Zurich).



1 mauvaise adhérence au support → rupture par décollement
2 risques de sédimentation et de ressuage → blocages
3 mauvaise ouvrabilité → mauvaise aptitude au pompage
4 béton collant → mauvaise miscibilité de l'accélérateur au béton
5 basse résistance au jeune âge

4.2.4 Recommandations pour la planification du béton projeté

Technique de la mise en place
Le béton projeté représente la technique de mise en place qui requiert le plus de connaissances et de savoir-faire. Densité et durabilité ainsi que rebond et formation de poussières résultent non seulement de la technologie du béton, mais aussi de la technique de mise en place (tab. 4.2.7). Pour ces raisons, les travaux en béton projeté sont généralement confiés à des entreprises spécialisées qui disposent du personnel qualifié et des machines nécessaires.

Malaxeur	• Type • Durée de malaxage • Dosage
Transport intermédiaire	• Engin de transport • Durée de transport • Protection contre la dessiccation/pluie • Température ambiante
Transbordement dans la machine à projeter	• Mode de transbordement • Malaxage ultérieur • Durée de transbordement
Machine à projeter	• Type • Mode de transport • Opérateur/entretien • Pression • Capacité
Tuyau de transport	• Matériau (plastique, métallique) • Géométrie (longueur, rayon de courbure, etc.)
Technique de buse	• Forme géométrique • Type d'addition de l'air, respectivement de l'eau • Pression de l'air, respectivement de l'eau

Tab. 4.2.7: Facteurs liés à la technique de mise en place influençant la qualité du béton projeté

Rebond
La réduction du rebond représente un des plus grands défis du procédé de projection. La quantité de refus dépend de:

- la compétence et l'expérience de l'opérateur à la buse
- le procédé de projection (voie humide ou sèche)
- la direction de projection (vers le haut, bas, horizontale)
- l'équipement (pression de l'air comprimé, buse, rendement de projection)
- la distance entre la buse et le support
- la nature du support (planéité, adhérence)
- la formulation du béton projeté (ciment, granulat, granularité, accélérateur, fibres)
- les propriétés du béton projeté (caractère collant, épaisseur de couche, résistance initiale)
- l'armature

En l'absence de mesures directes de la quantité du refus dans les conditions régnant sur place, le rebond ne peut être estimé qu'approximativement:

- le rebond du béton projeté par voie sèche varie entre 20–30 % en masse
- le rebond du béton projeté par voie humide varie entre 5–15 % en masse

La composition du rebond peut être grossièrement estimée à:

- 70–80 % en masse de granulat
- 10 % en masse de ciment
- 10–20 % en masse d'eau

En raison du rebond, la teneur moyenne en ciment peut augmenter de 10 à 40 % dans la couche de béton projeté. La grande proportion de granulat présente dans le rebond conduit à une réduction de la teneur en gravillons.

Mesures à prendre lors de l'exécution
Les essais de matériaux doivent être accompagnés de contrôles d'exécution spécifiques à l'ouvrage, p. ex. de la présence de cavités, de l'adhérence au support, du respect des profils, de l'enrobage de l'armature, etc.

Le béton ne sera projeté que sur un support propre, nettoyé, d'une température d'au moins +2° C, sauf dans des cas exceptionnels (p. ex. procédé par réfrigération). Le béton projeté doit adhérer sur toute la surface d'application. Les surfaces sèches d'application sont à humidifier au préalable afin qu'elles soutirent au béton projeté le moins d'eau possible. Des mesures doivent être prises pour retenir les infiltrations d'eau, notamment les venues d'eau, qui détériorent le béton projeté ou altèrent son adhérence. Il est préférable de les canaliser, les capter et les évacuer. Les mesures doivent être contrôlées et maintenues jusqu'à ce que le béton projeté soit capable de résister aux sollicitations. Les classes de béton projeté CBP 6 et CBP 7 à exigences élevées sont à protéger d'une dessiccation précoce par des mesures particulières de cure (p. ex. vaporisation d'eau).

Composition du béton projeté
La composition du béton projeté est formulée en fonction des exigences posées. Les tableaux 4.2.8 et 4.2.9 fournissent chacun un exemple de formulation pour un béton projeté par voie humide et pour un béton projeté par voie sèche.

Béton projeté par voie humide
La composition du béton projeté par voie humide est formulée en fonction des exigences posées au béton durci comme pour un béton à propriétés spécifiées selon la norme SN EN 206-1. Le tableau 4.2.8 donne un exemple de béton projeté par voie humide de la classe d'un béton projeté CP4 selon la norme SIA 198.

Béton projeté par voie sèche

La composition du béton projeté par voie sèche est formulée en fonction non seulement des exigences posées au béton durci mais aussi à l'égard des émissions de poussières et de la quantité de rebond. Pour la projection par voie sèche, la teneur en ciment est fixée et, en général, rapportée à 1000 litres de granulats en vrac. La somme des composants – souvent un mélange sec de 1000 litres de granulats terre humide et de ciment – occupe un volume supérieur à 1000 litres, parce que les particules de ciment enrobent le granulat et écartent ainsi les granulats. Pour une gâchée de production de 1.0 m³ de mélange sec, le dosage des composants doit être réduit. Le tableau 4.2.9 donne un exemple de béton projeté par voie sèche.

La projection occasionne pour le matériau une perte consécutive au rebond et une réduction du volume par le compactage. Selon l'exemple considéré dans le tableau 4.2.9, on obtient pour un mélange sec de 1 m³, avec un rebond de 25 % en masse, associé à un facteur de compactage de 1.35, environ 555 litres de béton projeté mis en place. La teneur en ciment du béton projeté mis en place atteint environ 454 kg/m³, ce qui correspond à une perte de ciment de 10 % en masse lors du rebond. Le rapport E/C du béton projeté appliqué est d'environ 0.46, pour une quantité d'eau de gâchage supposée de 110 kg/m³ et une perte d'eau, par le rebond, de 20 % en masse.

Tab. 4.2.8: Exemple de composition d'un béton projeté par voie humide de la classe d'un béton projeté CP4.

			Béton projeté par voie humide CP 4		
		Masse volumique [kg/dm³]	**Proportion [% en masse]**	**Teneur [kg/m³]**	**Volume [l/m³]**
Ciment	CEM II/B-M (S-T), (Robusto 4R-S)	3.05		425	139
Granulat	sable 0/4	2.68	60	1038	387
	gravier 4/8	2.68	40	692	258
Eau		1.00		200	200
Air					15
Adjuvant	fluidifiant, accélérateur		selon besoin		
Masse volumique et volume du béton frais				2355	1000
Rapport E/C			0.47		
Propriétés du béton sélectionnées classe de résistance au jeune âge			J2		

Tab. 4.2.9: Exemple de composition d'un béton projeté par voie sèche.

			Béton projeté par voie sèche		
		Masse volumique en vrac [kg/dm³]	**Proportion [% en masse]**	**Teneur [kg/m³]**	**Volume [litres]**
Ciment	CEM II/B-M (S-T), (Robusto 4R-S)	1.00		350	250*
Granulat	grave terre humide (3 % en masse d'eau)	1.45		1450	1000
Mélange sec (terre humide)				1900	1250
Adjuvant	fluidifiant, accélérateur		selon besoin		
Gâchée de production de 1.0 m³				**[kg/m³]**	**[l/m³]**
Ciment				280	200
Granulat	sable 0/4		55	638	440
	gravier 4/8		45	522	360

* correspond à un volume de 350 litres moins 100 litres compris dans les espaces vides du granulat

4.3 Béton autoplaçant

4.3.1 Introduction

Le béton autoplaçant (BAP, en anglais: Self Compacting Concrete, abrégé SCC) et le béton vibré se distinguent par leurs propriétés de béton frais et leur mode de compactage. Le BAP n'exige pas d'énergie de compaction, p. ex. par vibration ou damage, et possède les propriétés suivantes:

- une mobilité sans ségrégation (consistance mielleuse)
- le dégazage du béton pendant l'écoulement
- un remplissage complet du coffrage, y compris toutes les réservations, les espaces entre les barres d'armatures, etc. avec un béton homogène
- l'absence de tout travail de compactage.

Le BAP offre une alternative au béton vibré dans de nombreux domaines comme le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication et la remise en état. En comparaison avec le béton vibré, le BAP possède les avantages suivants:

- une cadence de mise en place accrue et une exécution plus rapide
- un besoin en personnel plus faible
- un bétonnage simple des éléments de construction étroits et des éléments à armature peu espacée
- un remplissage des zones difficilement accessibles
- une qualité régulière du béton dans l'ensemble de l'ouvrage
- une plus grande liberté de façonnage
- la réduction des émissions de bruit lors de la mise en place
- l'allègement du travail et la prévention des maladies induites par les vibrations
- des efforts réduits de finition

Fig. 4.3.1: BAP stable: le granulat est maintenu en suspension.

Les bétons capables de s'écouler, qui sont coulés sans vibration dans les pieux forés et parois moulées, ainsi que les bétons de la classe de consistance F5/F6, qui sont parfois utilisés dans le bâtiment, ne comptent pas parmi les bétons autoplaçant.

4.3.2 Exigences normatives

Spécification
Le béton autoplaçant doit satisfaire les exigences des normes SN EN 206-1 et SN EN 206-9. Il est spécifié en Suisse avec des classes de consistance particulières ou des valeurs cibles de l'étalement au cône d'Abrams et de l'aptitude à l'écoulement (tab. 4.3.1).

Classe de consistance	Classe	Valeurs limites (résultats individuels)
Classes d'étalement au cône d'Abrams	SF1	550–650 mm
	SF2	660–750 mm
	SF3	760–850 mm
Classes d'aptitude à l'écoulement (boîte en L)	PL1	≥ 0.80 avec 2 armatures
	PL2	≥ 0.80 avec 3 armatures

Tab. 4.3.1: Classes de consistance et valeurs limites pour un BAP selon la norme SN EN 206-9.

Contrôle
Les propriétés du béton frais sont contrôlées à l'aide de méthodes d'essais spécifiques au BAP.

Fig. 4.3.2: Essai d'étalement au cône d'Abrams selon la norme SN EN 12350-8.

Méthode d'essai d'étalement (SF)
Pour la détermination de l'étalement, on se sert du même cône que celui prescrit par la norme SN EN 12350-2. Le cône est placé sur une plaque plane humidifiée suffisamment grande (≥ 900 × 900 mm) et rempli de BAP. Une fois le cône soulevé, le BAP s'étale sous l'effet de gravité sans aucun apport d'énergie de compactage.

Etalement au cône d'Abrams:

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad [mm]$$

Eq. 4.3.1

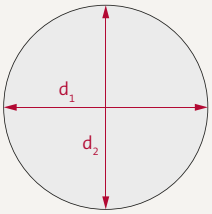


Fig. 4.3.3: Evaluation qualitative de la galette d'étalement au cône d'Abrams.

Accepter

Forme régulière: résultat optimal

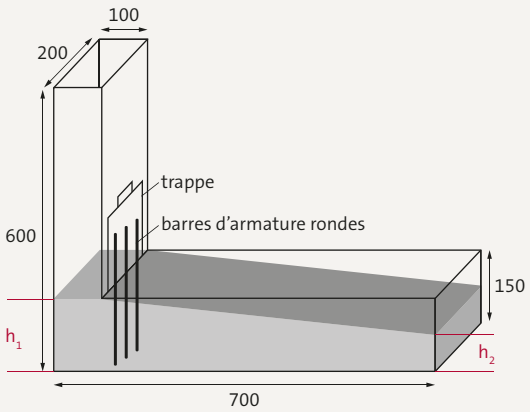
Refuser

Forme légèrement en cloche: pas assez d'eau ou de fluidifiant

Forme prononcée en cloche: ressuage en bordure: tendance à la ségrégation, manque de farine ou excès d'eau

Fig. 4.3.4: Essai à la boîte en L selon la norme SN EN 12350-10.

Aptitude à l'écoulement (essai à la boîte en L)
Le béton frais est introduit dans la partie verticale de la boîte en L, qui est séparée par une trappe de la partie horizontale. Derrière la trappe, sont disposés deux ou trois barres d'armatures, entre lesquelles le béton s'écoule après l'ouverture de la trappe. A la fin du mouvement d'écoulement, le niveau dans la partie verticale (h_1) et le niveau au bout de la partie horizontale (h_2) sont mesurés. Le rapport h_2/h_1 est la valeur de mesure de l'aptitude à l'écoulement PL. De plus, il est possible de mesurer le temps d'écoulement nécessaire après l'ouverture de la trappe jusqu'à ce que le béton atteigne l'autre bout de la partie horizontale.



Il est possible de spécifier, si nécessaire, d'autres classes de consistance parmi les exigences complémentaires. La consistance doit être contrôlée au moment de l'utilisation, respectivement pour du béton prêt à l'emploi, au moment de la livraison sur le chantier.

L'expérience montre qu'une valeur d'étalement inférieure à 620 mm constitue un risque de blocage et de nids de graviers. Dès que l'étalement dépasse 750 mm le risque de ségrégation s'accroît fortement. Pour la plupart des applications (radiers, dalles, murs, piles), on vise dans la pratique un étalement entre 650 et 720 mm, ce qui correspond approximativement à la classe SF2.

Non seulement la valeur de mesure, mais aussi la forme de la galette de béton est significative. Il faut en tenir compte lors de l'évaluation du béton (fig. 4.3.3).

Dans le cadre de l'essai initial, il faut démontrer que le béton satisfait aux propriétés exigées avec une marge suffisante. Ceci concerne en particulier la robustesse vis-à-vis des variations de la teneur en eau, dont il faut fixer l'intervalle admissible.

4.3.3 Technologie du béton

Ciment
En principe tous les ciments sont aptes à la fabrication de bétons autoplaçants, à condition qu'ils soient admis par la norme SN EN 206-1 pour les classes d'exposition sélectionnées. Les ciments les plus fréquemment utilisés sont les ciments Portland composés (p. ex. Optimo 4, Bisolvo 3R ou des ciments dits sur mesure).

A cause de la teneur élevée en fluidifiants, la montée en résistance du BAP est ralentie. Pour cette raison, les ciments suivants sont recommandés en cas de bétonnage par temps froid, de délais courts de décoffrage, d'éléments préfabriqués à haute résistance ou sévèrement exposés:

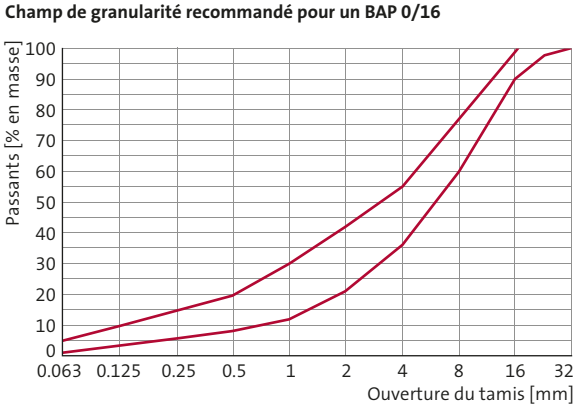
- Ciment Portland (Normo 5R) pour la préfabrication d'éléments élancés
- Ciment Portland à la fumée de silice (Fortico 5R) pour des éléments sévèrement exposés.

La haute teneur en ciment du BAP peut conduire à un fort développement de la chaleur d'hydratation. Pour la fabrication d'éléments massifs, l'emploi d'un ciment de classe de résistance 32,5 est recommandé:

- Ciment Portland composé (Bisolvo 3R).

Eau de gâchage
Puisque la teneur en eau a une influence significative sur la viscosité et l'autocompactage du béton autoplaçant, il est indispensable de respecter au plus près sa valeur cible. Le contrôle régulier et la prise en compte de la teneur en eau du granulat, en particulier du sable, sont donc très importants. L'usage d'eau résiduelle est possible, mais une teneur élevée en résidus solides a un effet négatif sur la stabilité du mélange.

Granulat
La porosité intergranulaire du granulat du BAP joue un rôle particulièrement important, puisqu'elle détermine le volume nécessaire de pâte de ciment. En principe, il est possible d'employer des granulats arrondis ou concassés. Le granulat arrondi présente l'avantage d'une plus petite demande en pâte de ciment grâce à sa porosité intergranulaire plus faible en vrac. A masse identique, la surface spécifique plus élevée du granulat concassé permet de le garder plus aisément en suspension. En règle générale, le BAP est confectionné avec du granulat de diamètre maximal de 16 mm afin de minimiser le risque de ségrégation et de blocage par les barres d'armature. L'expé-



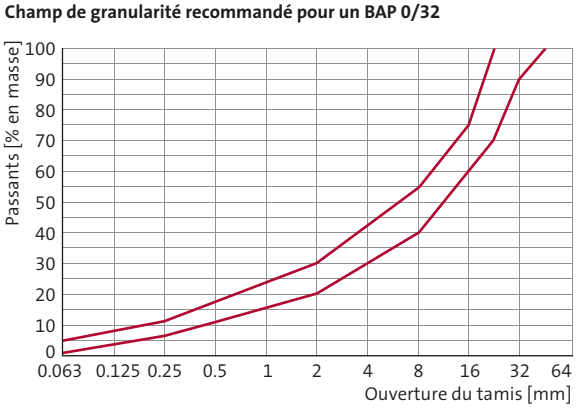


Fig. 4.3.5: Courbes granulométriques pour au BAP avec D_{max} = 16 mm (gauche) et D_{max} = 32 mm (droite). Les granularités ayant fait leurs preuves se situent dans le champ délimité par les courbes rouges (échelle logarithmique).

rience pratique montre qu'un diamètre maximal de 32 mm peut être choisi pour la classe de consistance SF1 en cas d'éléments de géométrie simple et avec un espacement suffisant des barres d'armatures.

La granularité se caractérise par une teneur accrue en sable et en fines. Pour une grave 0/16 mm, le passant au tamis 2 mm devrait se situer idéalement entre 38 % et 42 % en masse et la proportion < 0.125 mm entre 4 à 6 % en masse. Les courbes granulométriques, pour BAP avec D_{max} = 16 mm et D_{max} = 32 mm, sont données à la figure 4.3.5.

Tab. 4.3.2: Diamètre maximal recommandé pour le BAP en fonction de la classe de consistance.

Classe de consistance [-]	Diamètre maximal du granulat recommandé D_{max} [mm]
SF1	16 ou 32
SF2	8 ou 16
SF3	8
PL1	16 ou 32
PL2	8 ou 16

Le tableau 4.3.3 précise les recommandations concernant la teneur en farine (ciment, additions, granulat < 0.125 mm) en fonction de différentes graves.

Tab. 4.3.3: Teneur en farine recommandée pour des BAP en fonction de la grave employée.

Grave [mm]	Teneur en farine [kg/m³]
0/8	540–580
0/16	510–550
0/32	490–530

Adjuvants
Pour obtenir l'effet fluidifiant nécessaire à un BAP, on a recours à des fluidifiants à base de polycarboxylates et éthers polycarboxiliques. De manière générale, on tiendra compte du fait qu'un fort dosage en fluidifiants peut retarder le début de la prise du ciment.

Les stabilisateurs renforcent la stabilité du mélange, préviennent le ressuage et permettent d'éviter que les gros grains soient précipités vers le fond. Ils servent surtout à compenser les effets des variations de la teneur en eau du granulat.

Des entraîneurs d'air spécifiques sont employés pour augmenter la résistance au gel/dégel en présence de sel de déverglaçage.

Additions
Les exigences particulières quant à la mobilité du béton autoplaçant impliquent une teneur élevée en pâte de ciment. A défaut d'un ciment Portland composite, l'ajout d'additions est courant. En Suisse, les cendres volantes entrent le plus souvent dans la composition des BAP, mais occasionnellement des farines de roche sont utilisées.

Production
En principe, tous les types de malaxeurs habituels des centrales à béton prêt à l'emploi, des centrales de chantier et des usines de préfabrication se prêtent à la production de béton autoplaçant. Les recommandations concernant l'ordre d'introduction et le dosage des composants lors du gâchage d'un béton vibré sont aussi valables pour le BAP.

L'homogénéité du mélange et l'effet optimal des adjuvants et additions dépendent essentiellement de l'intensité et de la durée de malaxage. En règle générale, on part d'un temps de malaxage humide de 120 secondes.

Fig. 4.3.6: Coffrage mixte à poutres (h ≤ 3 m).

Fig. 4.3.7: Coffrage cadre (h = 3 à 5 m, selon type).

Transport
Le BAP ne peut être transporté qu'en camion malaxeur à cause de sa grande mobilité. Le tambour du malaxeur doit tourner lentement pendant toute la durée du transport. Dans le cas d'un terrain en forte pente, la fermeture du tambour avec un couvercle est recommandée. Avant le déchargement, le béton doit être malaxé à nouveau pendant environ 5 minutes à vitesse de rotation maximale.

Coffrage
La pression du béton frais et les exigences concernant la qualité de surface du béton jouent un rôle prépondérant dans le choix du type de coffrage et donc des coûts engendrés par celui-ci. Les exigences posées aux coffrages de mur des étages d'une hauteur habituelle (h ≤ 3 m) sont similaires pour le BAP et le béton vibré. En principe, les mêmes coffrages en bois ou métalliques peuvent être utilisés.

Les exigences, quant à la rigidité des coffrages, augmentent avec la hauteur de remplissage afin d'éviter des déformations et un éventuel tassement du béton coulé. Les coffrages à poutres ou cadres (fig. 4.3.6 et 4.3.7) satisfont normalement au mieux ces exigences. Les réservations et éléments incorporés doivent être fixés de manière à pouvoir résister à la poussée du béton frais.

Dans la pratique, la pression du béton frais sur le coffrage peut se répartir d'une manière similaire à la pression hydrostatique. La pression exercée sur le coffrage dépend essentiellement de la vitesse de remplissage, de la hauteur de déversement, des propriétés du béton frais (consistance, température, thixotropie et début de prise), de la rugosité du coffrage et de l'épaisseur du mur (effet de voûte). La mesure continue de la pression exercée sur le coffrage permet de déterminer la vitesse de remplissage optimale.

La mise en œuvre du BAP exige un coffrage étanche. Un coffrage vertical entre différentes étapes de bétonnage peut être réalisé à l'aide d'un élément en métal déployé suffisamment étayé. De même que pour les bétons usuels, des mesures pour prévenir les pertes de pâte de ciment sont à prendre, p. ex. étancher avec de la mousse de montage, obturation des ouvertures, etc.

Mise en place
En comparaison avec le béton vibré, la mise en place du BAP est plus simple et nécessite habituellement, même pour de grands volumes de béton, moins de personnel.

Le BAP peut être mis en place avec la plupart des méthodes conventionnelles, p. ex. à la grue, par pompage (par le haut ou par le bas) ou encore directement par la goulotte du camion malaxeur. Pour éviter les ségrégations, le béton ne doit pas tomber en chute libre dans le coffrage, bien que le BAP ait moins tendance à se démélanger en tombant qu'un béton vibré. La limitation de la hauteur de déversement, en plongeant la manchette de distribution dans le béton frais, permet aussi de prévenir l'occlusion d'air et réduit le nombre de pores de compactage importants (fig. 4.3.8).

Fig. 4.3.8: Mise en place du BAP à l'aide d'une manchette souple fixée à l'orifice de sortie de la benne.

La qualité de surface du BAP est fortement influencée par la vitesse de remplissage et le temps du dégazage autonome. Il faut noter que le dégazage du BAP dépend de la distance (recommandation 3–4 m) et de la durée d'écoulement. Le dégazage dans les coffrages pratiquement clos doit être rendu possible par des ouvertures ou autres mesures à cet effet.

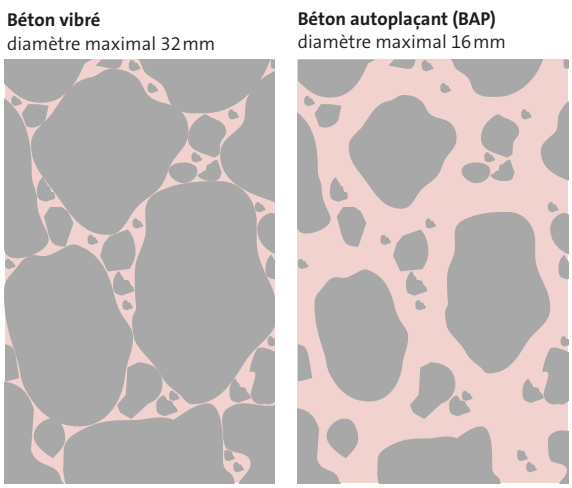
Il faut veiller à ouvrir la benne de la grue de manière à ce que le BAP puisse s'écouler lentement et régulièrement. Pour le bétonnage des murs, il est avantageux de travailler avec une manchette souple fixée à l'orifice de sortie. Lors d'un bétonnage à l'aide d'une benne de grue, il vaut mieux restreindre le nombre de points de remplissage. Ceux-ci sont à choisir en fonction des dimensions de l'élément à bétonner, de la disposition et du taux d'armature, de façon à ce que le BAP ne puisse pas s'étaler sur une distance de plus de 5 à 10 m dans le coffrage. Dans tous les cas, il faut faire attention à ce que l'écoulement horizontal soit limité afin que le béton reste homogène. Le risque de ségrégation durant l'étalement est d'autant plus grand que la distance d'écoulement est longue et le taux d'armature élevé.

Avec des dalles d'épaisseur supérieure à 50 cm, il peut être judicieux de mettre en place le BAP en deux couches afin de pouvoir laisser la couche inférieure se tasser et se dégazer brièvement avant de couler la seconde couche. Celle-ci doit avoir une épaisseur minimale de 10 cm pour faciliter le lissage et pour éviter que le niveau supérieur de l'armature ne s'imprègne.

Lissage des surfaces horizontales
L'écoulement et l'étalement gravitaire du BAP ne suffisent parfois pas pour obtenir une surface plane dans le cas de grands éléments horizontaux (radiers, revêtements, dalles). A la fin du bétonnage, il peut être avantageux de donner un coup de râteau. Une demi-heure à une heure et demie après la mise en place du BAP, un talochage de la surface est recommandé (fig. 4.3.9) afin de fermer les éventuelles fissures de tassement du béton frais. En principe, le lissage des surfaces de BAP est retardé en comparaison avec un béton vibré en raison de l'effet retardateur des fluidifiants.

Fig. 4.3.9: Lissage par talochage de la surface d'une dalle en BAP.

Fig. 4.3.10: Proportions volumiques différentes des bétons vibrés et autoplaçants.



Cure
Les bétons autoplaçants nécessitent les mêmes mesures de protection que les bétons conventionnels (chapitre 3.6). Puisque le BAP a une teneur en pâte de ciment plus élevée et un rapport E/C plus bas, le traitement de cure demande une attention particulière. Les surfaces horizontales (radiers, revêtements, dalles) sont à protéger de la dessiccation immédiatement après leur mise en place par des feuilles plastiques ou par la vaporisation d'un produit de cure.

Formulation
Volume de la pâte de ciment
Le volume de la pâte de ciment revêt une importance toute particulière dans la formulation. Il se compose du volume du ciment, des additions, de l'eau, des adjuvants et des pores d'air ainsi que des farines provenant du granulat ≤ 0.125 mm. Au contraire des bétons vibrés, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides interstitiels entre le granulat, mais aussi offrir un excédent de volume qui permet d'écarter le granulat (fig. 4.3.10).

L'excédent volumique de la pâte de ciment est à l'origine de la mobilité particulière du BAP (fig. 4.3.11). En général, le volume excédentaire s'élève à 90 à 120 l/m³ selon le type de granulat (concassé ou roulé) et son diamètre maximal.

La pâte de ciment doit présenter, en plus de l'aptitude à l'écoulement, une certaine viscosité pour maintenir les gros granulats en suspension sans qu'ils s'enfoncent. Le graphique à la figure 4.3.12 illustre la corrélation entre l'aptitude à l'écoulement (l'étalement au cône d'Abrams) et la viscosité (essai à la boîte en L). La plage optimale est marquée en rose.

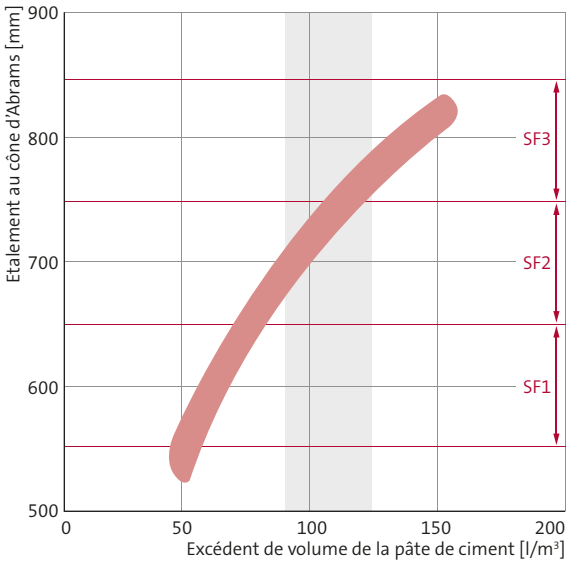


Fig. 4.3.11: Influence de l'excédent volumique de la pâte de ciment sur l'étalement au cône d'Abrams du béton frais.

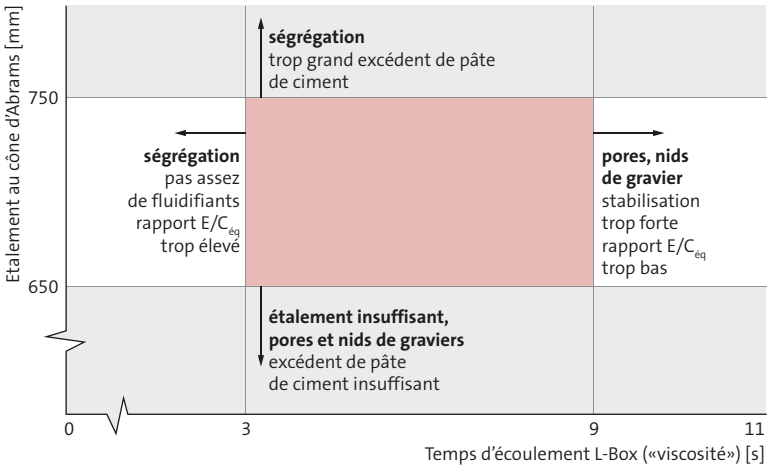


Fig. 4.3.12: Représentation schématique de la corrélation entre l'aptitude à l'écoulement et la viscosité du BAP.

4.3.4 Recommandations pour la planification du béton autoplaçant

Formulation du béton

Les différences fondamentales entre la composition d'un béton vibré et celle d'un béton autoplaçant sont mises en évidence par les deux exemples pratiques du tableau 4.3.4. Les formulations sont élaborées pour l'emploi d'un granulat roulé et doivent être modifiées en cas d'utilisation d'un granulat concassé. L'augmentation du volume de la pâte de ciment induit une diminution relative du volume du granulat par mètre cube de béton frais. Il en résulte un dosage typique de granulats d'environ 1700 kg/m³ de BAP.

Un granulat 0/16 mm du Plateau suisse possède en moyenne une porosité intergranulaire de 29 % vol., lorsque le rapport granulat fin sur gravillon se situe à environ 1:1. En supposant une demande d'excès de volume de la pâte de ciment de 90 l/m³, il en résulte un volume total de la pâte de ciment (y compris les pores d'air, mais sans les farines du granulat) de 354 l/m³ et une teneur en granulat, y compris les farines, de 1730 kg/m³ (masse volumique du granulat 2680 kg/m³) (voir fig. 4.3.13). Un granulat 0/16 mm contenant beaucoup de grains concassés, p. ex. de provenance alpine, possède une porosité intergranulaire moyenne de 32 % vol.. Son emploi présume un excédent de volume de la pâte de ciment de 110 l/m³ d'où il en résulte un volume total de la pâte de ciment (y compris les pores d'air) de 395 l/m³ et une proportion de granulat d'environ 1620 kg/m³ (masse volumique du granulat 2680 kg/m³).

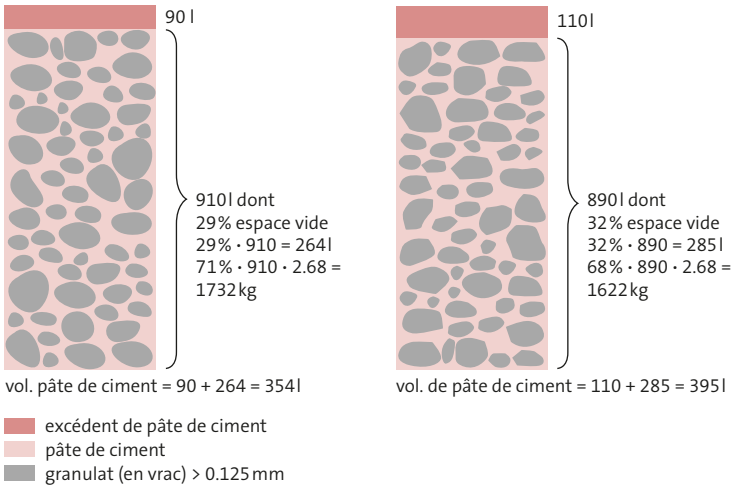


Fig. 4.3.13: Répartition des volumes dans un BAP courant avec un granulat roulé (à gauche) et concassé (à droite).

Tab. 4.3.4: Exemples de formulation typique d'un béton vibré et d'un béton autoplaçant.

			BAP à granulat essentiellement roulé			BAP à granulat partiellement concassé > 4 mm		
		Masse volumique [kg/dm³]	Proportion [% en masse]	Teneur [kg/m³]	Volume [l/m³]	Proportion [% en masse]	Teneur [kg/m³]	Volume [l/m³]
Ciment	CEM II/B-M (T-LL) (Optimo 4)	3.03		460	152		400	132
Addition	cendre volante	2.24					100	45
Granulat	sable 0/4	2.68	50	869	324	50	835	312
	gravillon roulé 4/8	2.68	20	347	130			
	gravillon roulé 8/16	2.68	30	521	194			
	gravillon concassé 4/8	2.68				20	334	125
	gravillon concassé 8/11	2.68				30	501	187
Eau		1.00		185	185		185	185
Air					15			15
Adjuvants	fluidifiant, stabilisateur		selon besoin (p. ex. FM 0.5–1.5 %, ST 0.1–0.3 % en masse de ciment)					
Masse volumique et volume du béton frais				2382	1000		2356	1000
Rapport E/C, resp. $E/C_{éq}$			0.40			0.43		

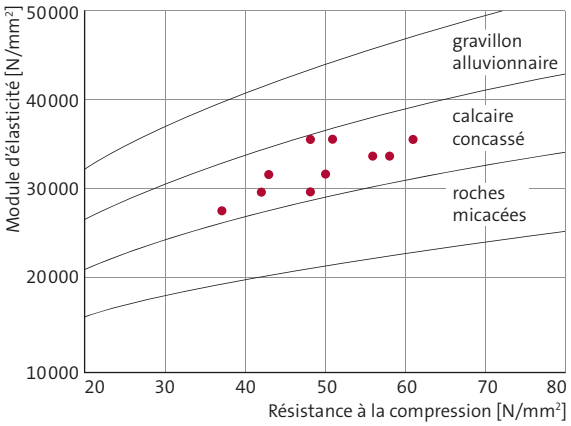
Propriétés du béton durci

Résistance à la compression

Grâce à la teneur accrue en pâte de ciment, le rapport E/C des BAP est souvent inférieur à celui des bétons comparables vibrés, entre 0.39 et 0.42. Il en résulte une résistance à la compression d'une à deux classes supérieure à celle d'un béton équivalent vibré.

Module d'élasticité

Le module d'élasticité d'un béton dépend du type et de la teneur du granulat et des propriétés de la pâte de ciment durcie (chapitre 3.8.3). Puisque la teneur en pâte de ciment du BAP est plus grande et que celle-ci possède un module d'élasticité plus bas que le granulat, le module d'élasticité d'un BAP est environ 10 % plus faible que celui d'un béton vibré d'une même résistance à la compression et produit avec le même granulat (fig. 4.3.14).



● BAP confectionné avec du gravillon alluvionnaire
— champs entre les courbes: béton vibré à granulats naturels selon SIA 262

Fig. 4.3.14: Module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression à 28 jours, domaine de valeurs pour des BAP.

Retrait et fluage

Le retrait de dessiccation est essentiellement régi par la quantité d'eau et très peu par la teneur en ciment ou encore le rapport E/C (voir fig. 3.9.3). De ce fait, le BAP montre un comportement de retrait de dessiccation similaire à celui d'un béton de bâtiment d'une classe de résistance à la compression C20/25 car il contient une quantité d'eau similaire. Pour restreindre l'ampleur du retrait, il est recommandé de limiter la quantité d'eau autant que possible et de ne pas dépasser 200 l/m³.

A cause de son plus grand volume de pâte de ciment, le BAP atteint un retrait 25 % plus élevé ainsi qu'un coefficient de fluage plus grand qu'un béton vibré de résistance à la compression comparable. Ces caractéristiques sont avantageuses en cas de retrait entravé. Le risque de fissuration n'est pas seulement une fonction du retrait. Il dépend autant du module d'élasticité, du coefficient de fluage, de la résistance à la traction et de la cure du béton que du degré d'entrave de l'élément de construction et des conditions d'humidité de l'environnement (voir chapitre 8.4).

Poinçonnement

La résistance au poinçonnement diminue lorsque, à résistance à la compression constante, le diamètre maximal du granulat diminue. Etant donné que le BAP possède, grâce au faible rapport E/C, une résistance à la compression plus élevée qu'un béton comparable vibré, l'effet du diamètre maximal réduit du granulat peut être au moins partiellement compensé. Il existe des modèles et diagrammes pour estimer les effets de divers paramètres (rayon de pile, armature de poinçonnement, résistance à la compression du béton, portée, hauteur statique, taux d'armature de la dalle). (voir cemsuisse-projet 20073, Utilisation des bétons autocompactants pour les planchers dalles).

Fig. 4.3.15: Le BAP facilite le bétonnage d'un plafond intermédiaire de tunnel.

Durabilité

Le BAP possède grâce à son rapport E/C bas, sa haute qualité de surface, sa microstructure dense et sa qualité homogène, une durabilité très élevée à condition qu'un traitement de cure suffisant ait été appliqué.

Fig. 4.3.16: Préfabrication d'éléments standard; le BAP se prête particulièrement bien à la préfabrication.

4.4 Monobéton

4.4.1 Introduction

Le monobéton est employé pour la réalisation, à l'extérieur comme à l'intérieur, de dalles en béton horizontales en une seule couche et avec une surface finie prête à l'emploi. Les champs d'application sont non seulement des surfaces de roulement, mais aussi des dalles en béton dans le bâtiment, notamment pour les constructions industrielles et commerciales. La surface du béton est, après la mise en place, le compactage et l'arasage, traitée en plus à la main ou à la machine. Les détails concernant le travail manuel de finition des surfaces de roulement, c.-à-d. des routes en béton, figurent au chapitre 7.5.

Le lissage à la machine est exécuté à l'aide de lisseuses mécaniques spéciales à hélices quelques heures seulement après la mise en place, lorsque la surface du béton est suffisamment ferme, mais encore humide mate (fig. 4.4.1). La zone superficielle lissée d'une épaisseur d'environ 3 mm devient plane et lisse, mais aussi très dure et résistante. Elle peut résister par elle-même, sans couche de protection, à toutes sortes de sollicitations. De ce fait, elle rend la couche de protection, y comprisla préparation du fond et l'application d'un pont d'adhérence, superflue. La durée du chantier est donc raccourcie.

Fig. 4.4.1: Lissage à la machine d'une dalle de radier avec une lisseuse à hélices (en haut) et à la main (en bas).

4.4.2 Exigences normatives

Les exigences normatives du monobéton sont définies dans la norme SIA 252 qui renvoie à la norme SIA 262 en ce qui concerne les propriétés du béton. Les exigences de base selon la norme SN EN 206-1 sont, pour le monobéton, identiques à celles du béton de grue. L'exécution en monobéton est une exigence complémentaire et implique éventuellement une résistance élevée à l'abrasion, respectivement à l'usure. La norme SIA 252 et la norme SN EN 13813 définissent, en fonction de trois niveaux de sollicitations, des classes de résistance à l'usure.

Le monobéton doit posséder une classe de résistance d'au moins C30/37. Les exigences élevées de la norme SIA 262 en matière de fissuration pour des charges quasi permanentes ou fréquentes sont requises pour les dalles en monobéton.

Les exigences relatives à la planéité sont plus élevées pour les surfaces finies de béton, par comparaison avec le béton du gros œuvre, et doivent être définies dans la convention d'utilisation. La norme SIA 252 règle les tolérances comme suit (tab. 4.4.1).

Distance de mesure en m	jusqu'à 1.0	jusqu'à 3.0	jusqu'à 4.0
Tolérance en mm	±2	±3	±4

Tab. 4.1.4: Tolérance de planéité d'une surface de monobéton selon la norme SIA 252.

Des variations de teinte ne sont pas entièrement inévitables. Elles peuvent être induites par des variations du matériaux ou de l'exécution. Ceci est particulièrement valable lors de travaux de réparation. La norme SIA 252 régit les exigences particulières d'esthétique.

L'utilisation de lisseurs rotatifs n'est pas permise pour la finition des surfaces de roulement selon la norme SN 640 461.

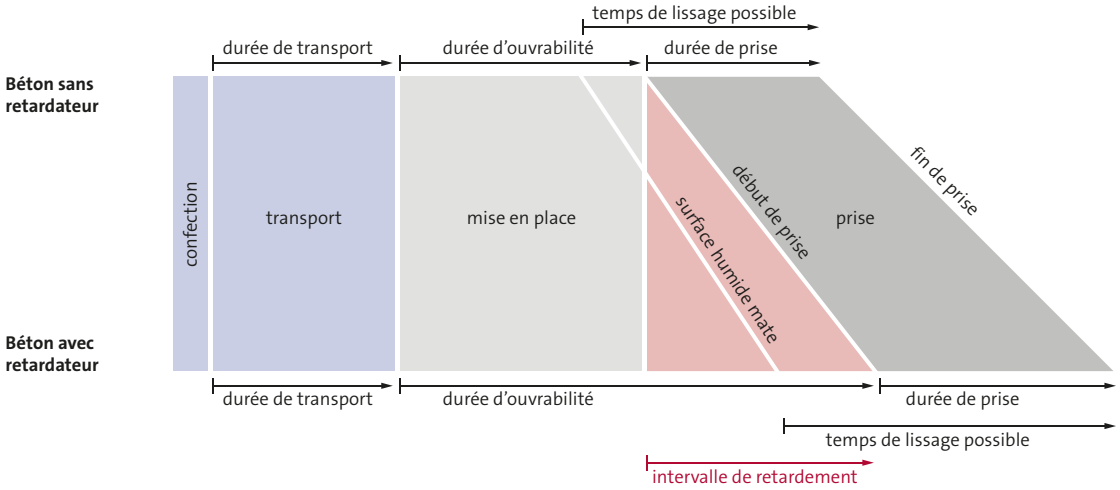


Fig. 4.4.2: Temps de lissage possible du monobéton avec ou sans retardateur.

4.4.3 Technologie du béton

Généralités

Le lissage à la machine de la surface doit se faire pendant un intervalle de temps bien défini (fig. 4.4.2). Le lissage doit avoir lieu juste avant le début de prise et se terminer avant la fin de la prise. Le moment juste du lissage est atteint lorsque la surface est suffisamment ferme pour qu'on puisse marcher dessus et est caractérisé par son état d'humidité. L'empreinte d'une chaussure doit être visible et s'enfoncer de quelques millimètres, tandis que la surface du béton doit être humide mate (fig. 4.4.3).

En cas de lissage prématuré, la lisseuse s'enfonce dans le béton et affecte la planéité, tandis qu'un lissage trop tardif perturbe l'adhérence de la zone de surface avec le béton sous-jacent.

L'état d'humidité de la surface est influencé par la quantité d'eau de ressuage qui dépend elle-même essentiellement de la composition et de la température du béton ainsi que du taux d'évaporation de l'eau en surface. Elle augmente lorsque la quantité d'eau de gâchage et de fluidifiant augmente, lorsque la teneur en farine baisse et l'hydratation se ralentit, ou lorsque la température est basse ou bien encore lorsque le béton contient du retardateur. L'évaporation en surface du béton, c.-à-d. la quantité d'eau évaporée, dépend de la vitesse de dessèchement. Celle-ci est fonction de la température et de l'humidité relative de l'air, de la vitesse du vent et de la température du béton (fig. 3.6.1).

Si la quantité d'eau évaporée est plus faible que la quantité d'eau ressuée, il reste de l'eau en surface. Celle-ci sera incorporée par le lissage dans la surface du béton et le rapport E/C de la zone de surface augmentera. Il s'ensuit une résistance moindre et un retrait amplifié, conduisant à une fissuration en réseau (craquelures) de la surface. Si la quantité d'eau évaporée est plus grande que la quantité d'eau ressuée, la surface du béton est déjà desséchée avant d'être praticable à pied et un lissage mécanique sans dégrader la surface n'est plus possible.

Ciment

Au moment du lissage, une hydratation avancée accompagnée de la formation d'une structure solide ne doit pas encore s'être développée dans le béton. Le lissage doit commencer juste avant le début de la prise et doit être terminé avant la fin de la prise. Cet intervalle de temps est déterminé par le raidissement du ciment, respectivement du béton. L'utilisation de ciments avec une montée en résistance lente permet un début de prise nettement plus tard que des ciments avec une montée en résistance rapide à moyenne. Par conséquent, le lissage devient possible à un moment plus tardif. Il est recommandé d'adapter la montée en résistance des ciments, respectivement des bétons à l'avancement des travaux de lissage (tab. 3.6.4). La tendance au ressuage des monobétons augmente lorsque la finesse de broyage respectivement la classe de résistance du ciment diminue. Des dosages en ciment de l'ordre de 320 et 340 kg/m^3 pour un diamètre maximal du granulat de 32 mm ont fait leurs preuves.

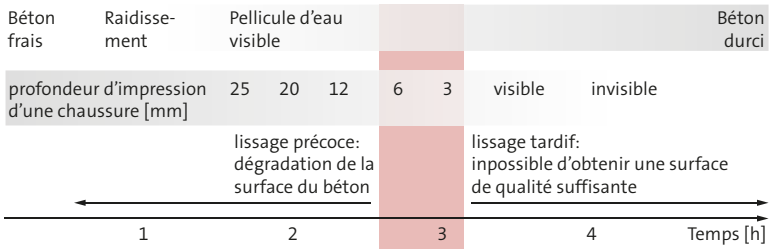


Fig. 4.4.3: Temps de lissage possible d'un monobéton à développement moyen des résistances.

Additions
Les farines de roche et la cendre volante sont employées dans les monobétons. La cendre volante est utilisée pour améliorer l'ouvrabilité du béton. Il faut noter que la cendre volante engendre un retardement de l'hydratation, ce qui reporte le début du lissage.

Farines
La teneur en farine doit être adaptée au type de granulat et au diamètre maximal, soit 350 et 450 kg/m^3, pour un granulat de 32 mm (voir chapitre 1.3.4, tab. 1.3.6).

Adjuvants
Les monobétons possèdent souvent des rapports E/C inférieurs à 0.50, ce qui rend le recours aux fluidifiants nécessaire pour la production du béton. Lors de l'utilisation de fluidifiants à base de PCE, il faut veiller à ce que ceux-ci soient adaptés spécifiquement aux monobétons. Dans le cas contraire, aucun raidissement significatif ne se produit pendant les deux premières heures, et le moment propice au lissage est nettement retardé. La tendance au ressuage des monobétons avec des fluidifiants à base de PCE est généralement très faible. Quelques fluidifiants peuvent provoquer l'apparition d'une croûte sur la surface fraîche du béton faisant croire à son durcissement tandis que le béton au cœur de la dalle est encore mou. L'emploi de retardateur peut être judicieux lors de grandes étapes.

Consistance
Le raidissement du béton dépend aussi de la classe de consistance choisie. Plus la consistance est raide, plus tôt le lissage peut être commencé. Les monobétons sont mis en œuvre, pour la majorité des chantiers, avec une consistance plastique de classe C3/F3. Lorsque la température extérieure est d'environ 20° C, le lissage des monobétons s'effectue environ 3 heures après la mise en place, le compactage et l'arasage. Le lissage des bétons de consistance très plastique se fait après un délai plus important.

Traitement de cure intermédiaire
Pendant l'intervalle de temps entre l'arasage de la surface de béton après le compactage et le lissage, la surface du béton ne doit pas se dessécher. S'il y a un risque de dessèchement, une cure intermédiaire s'avère nécessaire. Les mesures adéquates de cures intermédiaires consistent à vaporiser de l'eau, p. ex. avec un nettoyeur à haute pression ou un produit de cure à base de dispersion synthétique (fig. 4.4.4). Les produits de cure à base de paraffine ne sont pas adéquats. Les détails relatifs à la cure intermédiaire sont réglés dans la norme SN EN 13670.

L'omission d'une cure intermédiaire peut avoir comme conséquence une rigidification plus rapide de la surface du béton sous-jacent. La couche de mortier fin solidifiée en surface est appelée dans la pratique peau d'éléphant. Cette peau d'éléphant fait miroiter une résistance du béton, qu'il ne possède en réalité pas encore. Lors du lissage, il se produit alors ce qu'on appelle l'effet pudding

Fig. 4.4.4: Cure intermédiaire par vaporisation d'eau.

ou l'apparition de plis en surface qui résultent de la flottaison de la couche rigidifiée sur le béton sous-jacent encore mou.

La cure intermédiaire ne remplace en aucun cas le traitement effectif de cure qui doit respecter les prescriptions de la norme SIA 262. Pour les monobétons la classe de cure recommandée est NBK 4 (voir chapitre 3.6).

4.4.4 Recommandations pour la planification du monobéton

Conditions météorologiques
Le monobéton ne doit pas être mis en œuvre à des températures inférieures à 10° C et supérieures à 25° C. Avec des températures supérieures à 25° C, il faut prévoir des mesures supplémentaires. La température de l'air influence la montée en résistance et la quantité d'eau évaporée et ressuée. A une température de 10° C, la résistance au passage d'une personne est atteinte plus tard qu'à 20° C. La quantité d'eau ressuée est presque doublée alors que l'eau évaporée diminue de moitié. A l'inverse, à une température de 30° C, la résistance au passage d'une personne est atteinte plus tôt, la quantité d'eau ressuée est diminuée de moitié et l'évaporation est presque doublée.

Une exposition variable au soleil et à l'ombre de la surface du béton peut conduire à un comportement irrégulier du béton lors du lissage.

Cadence de mise en œuvre
La planification d'une cadence non réaliste de mise en œuvre provoque des temps d'attente des véhicules de livraison et peut avoir des effets négatifs sur la qualité du béton.

Les cadences moyennes de mise en œuvre des dalles en bétons sont:

- épaisseur de dalle 20 cm: env. 35 m^3 de béton par heure
- épaisseur de dalle 25 cm: env. 40 m^3 de béton par heure
- épaisseur de dalle 30 cm: env. 50 m^3 de béton par heure

On admet les ordres de grandeur suivants pour les cadences de lissage (voir fig. 4.4.1):
Lissage à la main 80 m^2/h
Lissage à la machine (lisseuse à double ailettes) 150 m^2/h

Un rendement plus élevé nécessite des mesures supplémentaires, p. ex. une deuxième équipe de travail.

Béton à air entraîné
Le lissage de la surface du béton influe de manière significative sur la quantité et la distribution des pores d'air entraîné. Les bétons à air entraîné ne doivent pas, ou seulement que brièvement, être lissés à l'aide de machines rotatives.

Joints
Les dalles en monobéton sont souvent planifiées sans joints. Si des joints s'avèrent nécessaires pour des raisons constructives, il faut observer les indications des chapitres 7.5 et 8.4.

Granulés durs
Les granulés durs, tels que p. ex. le corindon, le carbure de silicium ou des mélanges de ciment et granulés durs sont incorporés en surface du béton avec un dosage de 2 à 4 kg/m^2 afin d'augmenter la résistance à l'usure respectivement à l'abrasion. Les granulés durs doivent être dispersés aussi tôt que possible, soit directement après l'arasage de la surface du béton avec un équipement de saupoudrage piloté mécaniquement, soit à la main avec un chariot de saupoudrage, dès que la surface est praticable à pied (fig. 4.4.5). Une incorporation trop tardive des granulés peut provoquer l'apparition de creux et de décollements. Normalement, les granulés sont incorporés à l'aide d'une truelle mécanique circulaire, tandis que la finition de la surface se fait à l'aide des truelles mécaniques à hélice.

Pour une incorporation sans défaut des granulés durs, il est recommandé de l'effectuer seulement dans un environnement sans courants d'air et lorsque la teneur en eau du béton est suffisamment élevée, environ 160 l/m^3.

Fig. 4.4.5: Saupoudrage de granulés durs avec un chariot épandeur.

Traitement mécanique
La surface du monobéton peut être poncée pour satisfaire aux exigences esthétiques particulières. Pour l'obtention d'une surface régulière, un lissage à la machine est indispensable. Selon la qualité du béton et l'épaisseur de la couche, le béton peut être poncé 20 à 28 jours après sa mise en place. Habituellement, la surface est poncée en plusieurs passages jusqu'à ce que la texture fine typique du béton apparaisse, y compris éventuellement quelques grands granulats (fig. 4.4.6). En ponçant la surface plus profondément pour mettre à jour les plus gros granulats selon leurs plus grands diamètres, on obtient un aspect de surface ressemblant à un sol terrazzo.

Les polissages successifs avec un abrasif de plus en plus fin déterminent l'apparence finale mate, soyeuse à brillante de la surface. Il faut prévoir un traitement de protection de la surface du béton, soumise à de telles exigences esthétiques, afin de conserver durablement son aspect.

Les surfaces de béton coffrées qui doivent satisfaire à certaines exigences esthétiques sont traitées au chapitre 7.1.

Fig. 4.4.6: Monobéton avec une surface de béton poncée.