Chapitre 5

Bétons à composition particulière

5.1 Béton de recyclage **156**
5.1.1 Introduction 156
5.1.2 Exigences normatives 156
5.1.3 Technologie du béton 158
5.1.4 Recommandations pour la planification du béton de recyclage 160

5.2 Béton léger **164**
5.2.1 Introduction 164
5.2.2 Exigences normatives 164
5.2.3 Technologie du béton 165
5.2.4 Recommandations pour la planification du béton léger 167

5.3 Béton renforcé de fibres **170**
5.3.1 Introduction 170
5.3.2 Exigences normatives 171
5.3.3 Technologie du béton 172
5.3.4 Recommandations pour le dimensionnement du béton fibré 174

5.1 Béton de recyclage

5.1.1 Introduction

L'emploi de granulats recyclés pour la production de béton, dit de recyclage, gagne en importance dans le cadre d'un mode de construction durable. La consommation de granulats naturels peut être ainsi réduite et permet d'éviter le dépôt des matériaux de démolition dans les décharges.

En principe, deux types de granulats recyclés sont distingués: les granulats de béton (C) et les granulats de gravats mixtes (M). Le granulat de béton est obtenu par traitement du béton de démolition des constructions en béton (fig. 5.1.1, centre). Le granulat de gravats mixtes est récupéré des démolitions des constructions massives mixtes en béton normal et léger, ainsi que de briques en argile cuite, briques silico-calcaires et en maçonnerie de pierres naturelles (fig. 5.1.1, à droite).

Les deux types de granulats recyclés se distinguent d'un granulat naturel par leurs propriétés et montrent des variations dans leurs éléments constitutifs.

Selon le type de granulat recyclé employé, le béton de recyclage est classé soit en béton de recyclage RC-C à granulats de béton, soit en béton de recyclage RC-M à granulats de gravats mixtes.

5.1.2 Exigences normatives

Le béton de recyclage est employé comme béton maigre, de remplissage et d'enrobage non normé et comme béton de construction selon les normes SN EN 206-1 et SIA 262. Selon l'annexe nationale de la SN EN 206-1, le béton de recyclage est réglementé par le cahier technique SIA 2030. Selon ce cahier technique, le béton de recyclage est défini comme un béton dont le granulat > 4 mm se compose d'au moins 25 % de granulats recyclés. Le tableau 1.3.3 donne les exigences pétrographiques à l'égard de la composition des granulats recyclés de bétons et de gravats mixtes pour leur emploi pour le béton de construction. La composition doit être déclarée pour les granulats à diamètre > 4 mm, au contraire de la norme SN EN 933-11 (Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – partie 11: essai de classification des constituants des gravillons recyclés) qui prévoit, dans un premier temps, un diamètre > 8 mm.

Pour le béton de recyclage RC-C à granulats de béton, la part du granulat > 4 mm doit contenir:

- au moins 25 % en masse de granulats recyclés R_c, constitués de béton, produits de béton, granulats traités aux liants hydrauliques, mortier et éléments de maçonnerie en béton et,
- au maximum 5 % en masse de granulats recyclés R_b, constitués d'éléments de briques et tuiles en argile cuite, briques silico-calcaires, béton cellulaire non flottant

Fig. 5.1.1: Granulat pour béton, à gauche: granulat naturel roulé, au centre: granulat de béton, à droite: granulat de gravats mixtes.

Béton de recyclage		Classe d'exposition				
Désignation	**Teneur en granulats recyclés**	**X0**	**XC1 (sec)**	**XC1 (humide), XC2, XC3**	**XC4**	**XD, XF, XA**
RC-C	$R_c \geq 25\,\%$ en masse $R_b < 5\,\%$ en masse	admis				essais préliminaires prescrits
RC-M	$5\,\%$ en masse $\leq R_b \leq 25\,\%$ en masse et $R_c + R_b \geq 25\,\%$ en masse	admis			essais préliminaires prescrits	non admis
	$R_b > 25\,\%$ en masse	admis		essais préliminaires prescrits		

R_c: béton, produits de béton, granulats naturels traités aux liants hydrauliques, mortier et éléments de maçonnerie en béton
R_b: éléments de briques et tuiles en argile cuite, briques silico-calcaires, béton cellulaire non flottant

Tab. 5.1.1: Utilisation du béton de recyclage selon les classes d'exposition d'après le cahier technique SIA 2030.

Pour le béton de recyclage RC-M à granulats de gravats mixtes, la part du granulat > 4 mm doit contenir:

- au moins 5 % en masse R_b et,
- au moins 25 % en masse $R_b + R_c$.

Le cahier technique SIA 2030 restreint l'utilisation du béton de recyclage à propriétés spécifiées sur la base de considérations de durabilité. Les exigences relatives au béton de recyclage en fonction des classes d'exposition sont indiquées au tableau 5.1.1.

Le béton de recyclage RC-C peut être employé comme béton de construction pour le bâtiment (fig. 5.1.2). Il est cependant recommandé de n'utiliser le béton de recyclage RC-M qu'à l'intérieur ou pour des éléments de construction protégés des intempéries. L'emploi du béton de recyclage RC-M avec une teneur en R_b > 25 % en masse est admis sans essais préliminaires spécifiques seulement pour les classes d'exposition XC0 et XC1 (sec). Pour les classes XD, XF, XA1-3, ainsi que pour le béton précontraint et pour les éléments soumis à un risque de fatigue, le béton de recyclage RC-M ne peut en aucun cas être utilisé et l'emploi d'un béton de recyclage RC-C exige des essais préliminaires en fonction des propriétés visées.

Le cahier technique SIA 2030 prévoit également l'emploi de sable recyclé (classe granulaire 0/4 mm). En cas d'exigences particulières concernant la durabilité, il faut renoncer à leur utilisation.

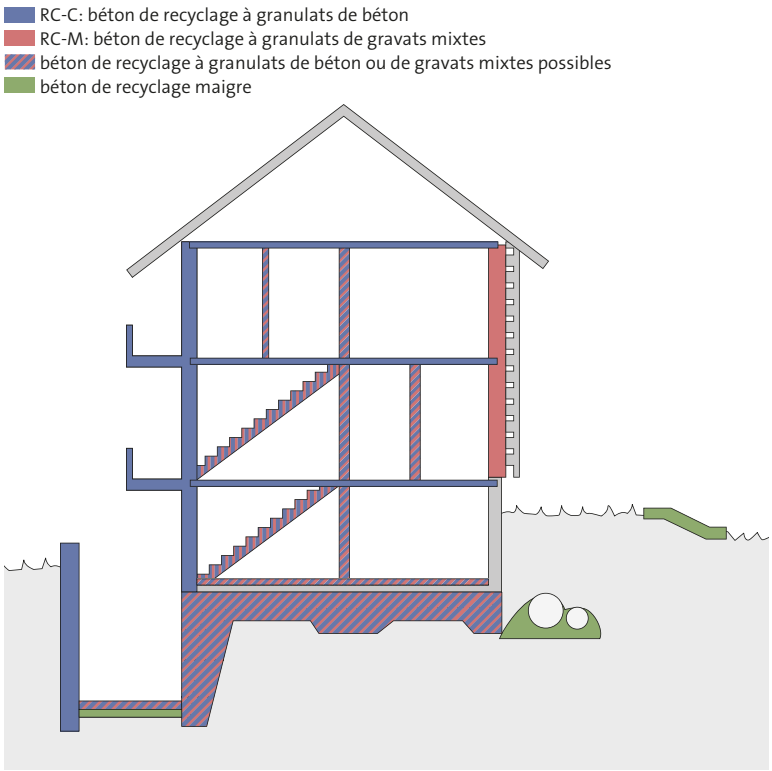


Fig. 5.1.2: Champs d'utilisation du béton de recyclage.

5.1.3 Technologie du béton

Ciment

Tous les ciments admis par la norme SN EN 206-1 sont aptes à la production de béton de recyclage. En vue de la réduction des émissions de CO_2, il est recommandé de choisir un ciment à teneur réduite en clinker de ciment Portland (p. ex. ciments CEM II/B). En comparaison avec un béton à granulats naturels concassés, il faut compter avec un besoin en ciment d'environ 20 à 30 kg/m³ plus élevé. Dans le cas d'un béton maigre, le dosage en ciment ne sera pas augmenté, il faut compter avec un rapport E/C accru et utiliser un plastifiant/fluidifiant.

Granulats

Généralités

Les propriétés des granulats recyclés sont essentiellement influencées par l'origine des matériaux de récupération et leur processus de traitement. Elles se distinguent partiellement beaucoup de celles d'un granulat naturel.

Forme des grains

Le processus de traitement (concassage des matériaux récupérés) génère une forme en général concassée non cubique du granulat recyclé.

Masse volumique

La masse volumique du granulat recyclé est plus faible et, en raison de l'hétérogénéité du matériau d'origine, varie plus fortement que celle d'un granulat naturel (tab. 5.1.2).

Granulat	Masse volumique ρ après séchage à l'étuve [kg/m³]
Granulat naturel (gravier-sable)	2650–2700
Granulat de béton	2350–2550
Granulat de gravats mixtes	2100–2500

Tab. 5.1.2: Masse volumique après séchage à l'étuve du granulat recyclé et naturel.

Absorption d'eau

Les granulats recyclés montrent une plus forte absorption d'eau que les granulats naturels à cause de leur porosité plus élevée (fig. 5.1.5).

Fig. 5.1.3: Granulat naturel: vue macroscopique (à gauche), vue microscopique en lumière UV (à droite). En lumière UV les granulats denses apparaissent noirs sur le fond clair de la pâte de ciment poreuse.

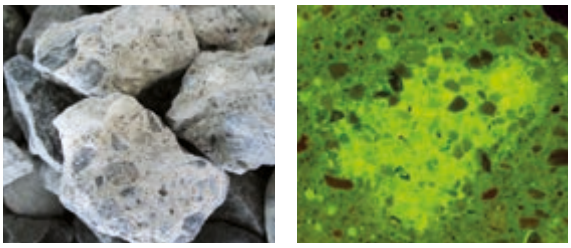


Fig. 5.1.4: Granulat recyclé: vue macroscopique (à gauche), vue microscopique en lumière UV (à droite). La porosité capillaire plus élevée de la pâte de ciment au sein du granulat recyclé apparait plus jaunâtre en lumière UV que celle de la pâte de ciment environnante plus dense.

L'absorption d'eau est d'autant plus grande que la masse volumique du granulat recyclé est faible (fig. 5.1.5). Pour prévenir une perte de l'ouvrabilité du béton frais, il est recommandé d'augmenter le dosage de l'eau (voir chapitre 1.2) ou d'humidifier au préalable le granulat recyclé lors de la fabrication du béton. En général, l'absorption d'eau d'un granulat recyclé atteint, après 10 minutes d'immersion dans l'eau (W_{10}), 90 % de la valeur W_{24} qui correspond à une immersion de 24 heures. Pour cette raison, la formulation du béton de recyclage se base habituellement sur la valeur W_{10} du granulat.

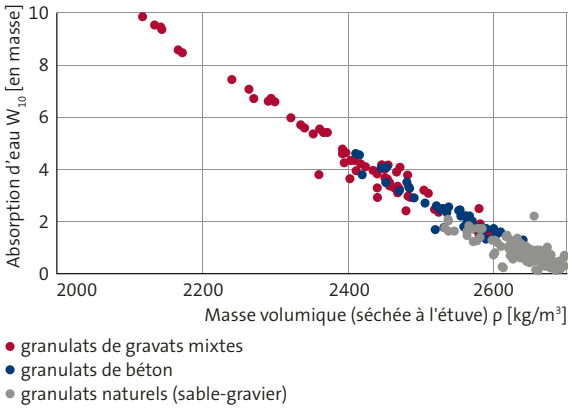


Fig. 5.1.5: Absorption d'eau (W10) des granulats naturels et recyclés, de différentes classes granulaires, en fonction de la masse volumique (ρ, après séchage à l'étuve).

Résistance du grain

Les résistances du granulat recyclé sont en général plus faibles que celles d'un granulat naturel et varient en fonction du type de matériau (fig. 5.1.6).

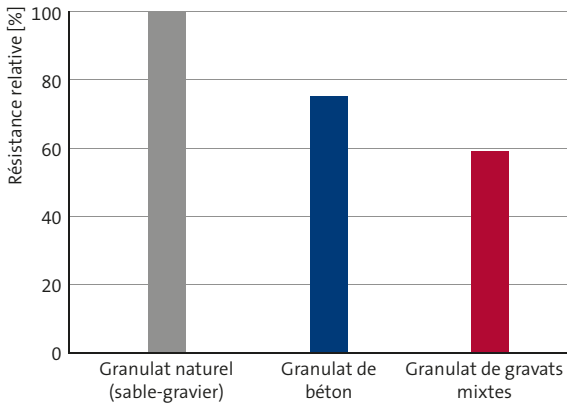


Fig. 5.1.6: Valeurs indicatives de la résistance relative moyenne du grain d'un granulat de béton et d'un granulat de gravats mixtes en comparaison avec un granulat naturel (gravillon).

Eléments constitutifs

Les éléments constitutifs du granulat recyclé sont soumis à de grandes variations (fig. 5.1.7, à gauche dans le cas granulat de béton et à droite celui d'un granulat de gravats mixtes).

Réaction alcalis-granulats

En raison de l'origine souvent inconnue et constamment changeante des matériaux de démolition, il est difficile de fournir une preuve représentative de la résistance à la RAG d'un béton de recyclage avec un effort de contrôle raisonnable. De ce fait, la production des bétons résistants à la RAG avec des granulats recyclés n'est pas recommandée (voir chapitre 6.4).

Teneur en chlorures

La teneur en chlorures solubles dans l'eau et dans l'acide doit être contrôlée dans les granulats recyclés afin de prévenir l'emploi des matériaux de démolition chargés en chlorures pour la production de béton de recyclage. Le béton de recyclage à propriétés spécifiées est soumis aux mêmes exigences concernant les classes de teneur en chlorures (Cl_x) que le béton à granulats naturels (tab. 2.3.5).

Teneur en soufre et en sulfates

Les composés soufrés présents en grande quantité dans le béton peuvent provoquer des réactions de gonflement interne capables de dégrader complètement un élément en béton (voir chapitre 8.8). Ils proviennent normalement de la récupération des crépis de gypse, des chapes d'anhydrite et des plaques en plâtre non trié. Pour réduire le risque de dégradation, les exigences de la norme SN EN 12620, concernant les éléments constitutifs et la teneur en soufre total et en sulfates, sont à respecter (voir chapitre 1.3). La teneur en éléments impropres (X), auxquels appartiennent le gypse et l'anhydrite, ne doit pas dépasser 0.3 % en masse du granulat recyclé.

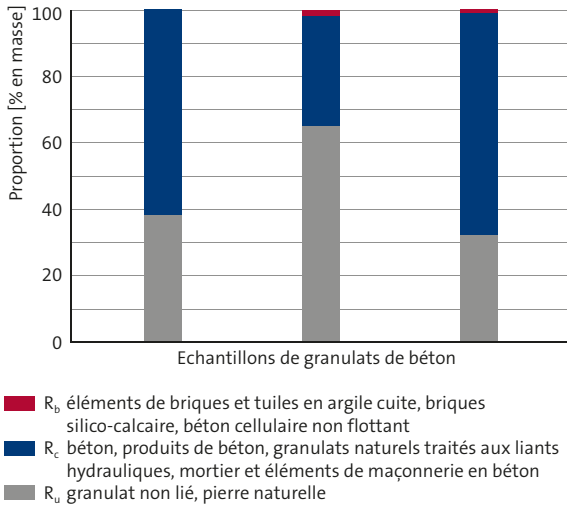


Fig. 5.1.7 (gauche): Variations des éléments constitutifs de trois échantillons de granulats de béton (prélèvements répartis sur env. 3 mois).

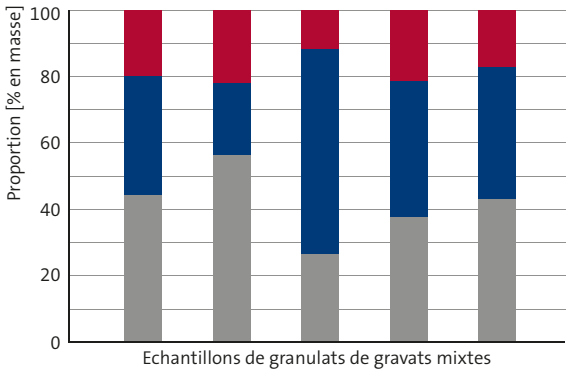


Fig. 5.1.7 (droite): Variations des éléments constitutifs de cinq échantillons de granulats de gravats mixtes (prélèvements répartis sur env. 4 mois).

Adjuvants
Le dosage des fluidifiants est légèrement plus élevé en comparaison avec un béton similaire, mais à granulats naturels. Il existe des fluidifiants spéciaux à haute performance pour les bétons de recyclage.

Rapport E/C
Les exigences à l'égard du rapport E/C de la norme SN EN 206-1 s'appliquent au béton de recyclage. Il faut déterminer l'absorption d'eau selon la norme SN EN 1097-6 comme pour le granulat naturel et en tenir compte pour la confection du béton. La teneur en eau du granulat recyclé doit être prise en compte (voir exemple 16) dans le calcul du rapport E/C lors du contrôle du béton frais.

5.1.4 Recommandations pour la planification du béton de recyclage

Spécification
La spécification en tant que béton à propriétés spécifiées se fait à l'aide des suffixes RC-C pour le béton de recyclage à granulats de béton et RC-M pour le béton de recyclage à granulats de gravats mixtes. La résistance à la compression sert à la spécification de base du béton de recyclage.

L'évaluation des propriétés du béton de recyclage repose, en dehors de la composition du granulat, sur le module d'élasticité moyen E_{rcm} et la masse volumique moyenne ρ_{rcm}. Pour le béton de recyclage à propriétés spécifiées selon la norme SN EN 206-1, il faut définir comme exigence complémentaire ces deux propriétés.

Les teneurs en R_c et R_b sont à déclarer et indiquer dans la liste des sortes de béton. Si des teneurs en granulats R_c plus grandes que 25 % en masse sont exigées, elles doivent être définies selon les catégories de la norme SN EN 12620. Des teneurs en granulats R_b plus grandes que 25 % en masse doivent être définies par paliers de 10 % (25, 35, ... % de la masse).

Béton de recyclage	Béton maigre	C20/25 Béton à la grue XC1, XC2	C25/30 Béton à la grue XC1, XC2	C25/30 Béton pompé XC1, XC2	C30/37 Béton pompé XC1, XC2
Teneur en granulats recyclés [% en masse]	100 %				25 %

Fig. 5.1.9: Valeurs indicatives des teneurs en granulats recyclés pour différents bétons de recyclage.

Exemple 24
Spécification d'un béton de recyclage à propriétés spécifiées pour un mur porteur extérieur:
Béton selon SN EN 206-1 et cahier technique SIA 2030,
Exigences de base:
RC-C
Classe de résistance à la compression C 30/37
Classe d'exposition XC4
Dimension maximale du granulat D_{max} 32
Classe de teneur en chlorures Cl 0.10
Classe de consistance C3

Exigences complémentaires:
Module d'élasticité > 25 000 N/mm²
Type de ciment CEM II/B-M
$R_c + R_b \geq 40$ % en masse

Propriétés du béton durci
Résistance à la compression
Les classes de résistance à la compression du béton de recyclage correspondent à la norme SN EN 206-1 (voir chapitre 3.8.1). En comparaison avec un béton à granulats naturels, le béton de recyclage ayant un rapport E/C similaire possède une résistance à la compression plus faible. Ceci provient de la résistance mécanique plus faible du granulat recyclé ainsi que de la proportion de pâte de ciment plus élevée.

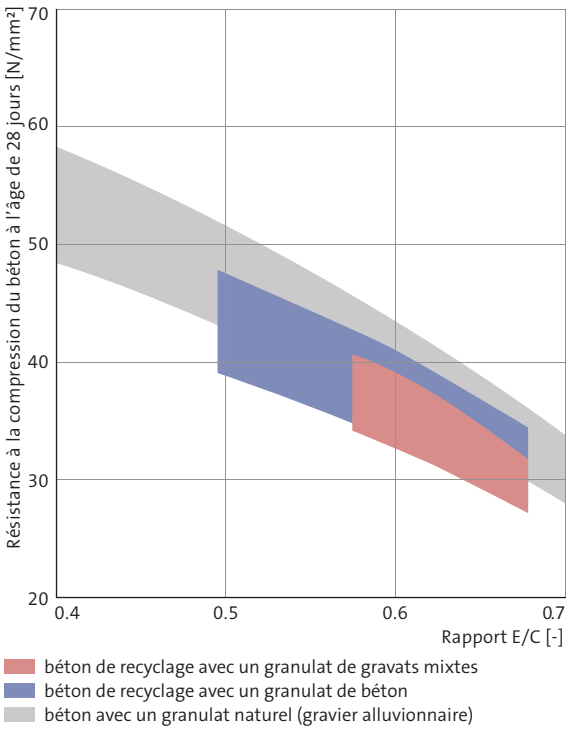


Fig. 5.1.8: Résistance à la compression en fonction du rapport E/C du béton de recyclage fabriqué avec le ciment Optimo 4.

La résistance à la compression du béton de recyclage diminue avec une teneur croissante en granulats recyclés. Les bétons de recyclage avec une proportion de granulats de gravats mixtes jusqu'à 100 % sont surtout employés comme béton maigre à cause de leur faible résistance à la compression. Les bétons de construction contiennent en règle générale, selon la classe de résistance à la compression exigée, une teneur en granulats recyclés de 40 à 80 % de la masse, principalement des granulats de béton (fig. 5.1.9).

Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton de recyclage dépend du type de granulat recyclé employé, il est inférieur à celui d'un béton à granulats naturels (fig. 5.1.10). Le module d'élasticité plus bas résulte du module d'élasticité (de la masse volumique) plus faible du granulat recyclé ainsi que de la proportion plus élevée de la pâte de ciment.

Pour assurer le module d'élasticité exigé, le cahier technique SIA 2030 prescrit que le producteur doit contrôler et déclarer régulièrement le module d'élasticité tous les trois respectivement six contrôles de la résistance à la compression du béton de recyclage RC-M et RC-C.

Si les déclarations du producteur ou des résultats d'essai du module d'élasticité du béton de recyclage E_{rcm} font défaut (pas de valeurs déclarées), il faut utiliser le module d'élasticité du béton à granulat naturel en tenant compte d'un facteur de correction η_r (tab. 5.1.3, éq. 5.1.1).

Pour le module d'élasticité E_{rcm} il faut utiliser la valeur d'un béton de même résistance à la compression f_{cm} avec du granulat naturel d'origine aussi similaire que possible, ou bien déterminer la valeur selon SIA 262 (voir chapitre 3.8.3, éq. 3.8.8).

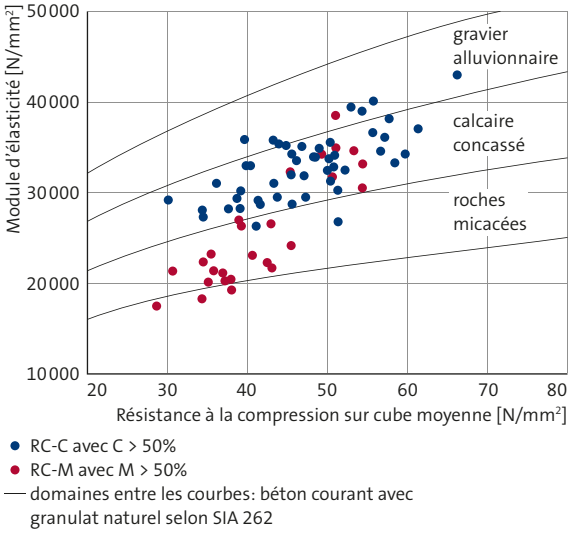


Fig. 5.1.10: Module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression à 28 jours du béton de recyclage RC-C et RC-M en comparaison avec les bétons à granulats naturels (graves alluvionnaires).

$$\eta_r = \frac{E_{rcm}}{E_{cm}} \leq 1$$

η_r facteur de correction du béton de recyclage
E_{rcm} module d'élasticité moyen du béton de recyclage
E_{cm} valeur moyenne du module d'élasticité du béton de même résistance à la compression f_{cm} à granulats naturels d'origine aussi similaire que possible

η_r = 0.9 (teneur en $R_c \leq 50$ % en masse)
η_r = 0.8 (teneur en $R_c > 50$ % en masse)

Eq. 5.1.1

Il faut respecter les valeurs minimales suivantes pour le béton de recyclage RC-M:

- $E_{rcm} \geq 19\,000$ N/mm² et
- $\rho_{rcm} \geq 2000$ kg/m³

En absence de valeurs déclarées, ces valeurs minimales sont à utiliser lors de la planification. Si la masse volumique est déclarée, il est possible d'estimer le module d'élasticité du béton de recyclage E_{rcm} comme indiqué au tableau 5.1.3. La valeur de la masse volumique du béton à granulat naturel est alors fixée à ρ_{cm} = 2450 kg/m³.

Types de béton RC	Teneur en granulats recyclés	Module d'élasticité	
		Sans valeur déclarée	Masse volumique déclarée (ρ_{cm} = 2450 kg/m³)
RC-C	Rc ≤ 50 % en masse Rc > 50 % en masse	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.9$ $E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.8$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.9 \cdot (\rho_{rcm} / \rho_{cm})$
RC-M	Rc ≤ 50 % en masse Rc > 50 % en masse	$E_{rcm} \geq 19\,000$ N/mm² $\rho_{cm} \geq 2000$ kg/m³	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.8 \cdot (\rho_{rcm} / \rho_{cm})$

E_{rcm} valeur moyenne du module d'élasticité du béton de recyclage
E_{cm} valeur moyenne du module d'élasticité du béton de même résistance à la compression à granulats naturels d'origine aussi similaire que possible
ρ_{rcm} valeur moyenne de la masse volumique du béton de recyclage
ρ_{cm} valeur moyenne de la masse volumique du béton à granulats naturels d'origine aussi similaire que possible

Tab. 5.1.3: Estimation du module d'élasticité du béton de recyclage selon le cahier technique SIA 2030.

Retrait et fluage
Autant le retrait que le fluage augmentent avec une teneur croissante en granulats recyclés et sont supérieurs à ceux d'un béton à granulats naturels avec une résistance à la compression identique. Le retrait plus important est surtout causé par la teneur plus élevée en eau et le plus grand volume de la pâte de ciment (voir chapitre 3.9).

Si le planificateur ne dispose pas d'informations concernant le retrait et le fluage du béton de recyclage, il peut évaluer d'après le cahier technique SIA 2030, son comportement de manière analogue au béton selon SN EN 206-1 sur la base du module d'élasticité selon l'approche suivante:

Comportement de retrait: $\varepsilon_{rcs,\infty} = \frac{\varepsilon_{cs,\infty}}{\eta_r}$

$\varepsilon_{rcs,\infty}$ valeur finale du retrait du béton de recyclage
$\varepsilon_{cs,\infty}$ valeur finale du retrait du béton selon SN EN 206-1
η_r facteur de correction du béton de recyclage

Eq. 5.1.2

Comportement de fluage: $\phi_{rc}(t,t_0) = 1.25 \cdot \phi(t,t_0)$

$\phi_{rc}(t,t_0)$ coefficient de fluage du béton de recyclage
$\phi(t,t_0)$ coefficient de fluage du béton à granulats naturels d'origine aussi similaire que possible

Eq. 5.1.3

Le dimensionnement à l'effort tranchant et la vérification du poinçonnement s'effectuent selon la norme SIA 262 pour RC-M suivant l'approche $D_{max} = 0$ comme pour le béton léger.

Composition du béton
Au tableau 5.1.4 figurent les compositions ainsi que quelques propriétés du béton durci d'un béton de recyclage à granulats de béton, respectivement d'un béton à granulats de gravats mixtes en comparaison avec un béton à granulats naturels.

Fig. 5.1.11: Plaque polie d'un béton de recyclage à granulat de gravats mixtes.

Aspects écologiques
L'utilisation des granulats recyclés permet d'épargner les ressources naturelles et de diminuer la mise à contribution territoriale. Le volume réduit des matériaux de démolition à évacuer en décharge soulage l'environnement. Cependant, l'emploi de granulats recyclés pour la production de béton ne mène pas à une réduction significative des émissions de CO_2. Au contraire, en raison des teneurs accrues en ciment, on constate souvent même une augmentation des émissions.

Néanmoins, de nombreux maîtres d'ouvrage exigent l'emploi de béton de recyclage (p. ex. recommandations KBOB), notamment pour les constructions nouvelles selon le standard de durabilité MINERGIE-ECO. Dans ce standard de durabilité se trouvent les exigences suivantes concernant l'emploi de béton de recyclage pour les nouvelles constructions:

- La proportion volumique des éléments de construction en béton de recyclage (selon CT SIA 2030), rapportée au volume de béton de construction en principe réalisable en béton de recyclage, doit être supérieure à 50 %.
- La distance entre la centrale à béton RC et le chantier ne doit pas dépasser 25 km. S'il n'y a pas de possibilité de commander du béton de recyclage dans un rayon de 25 km ou si le granulat recyclé doit être transporté jusqu'à la centrale à béton, cette exigence ne s'applique pas.
- Les éléments constitutifs du granulat recyclé doivent satisfaire aux exigences du cahier technique SIA 2030.

			Béton de recyclage à granulat de béton		
		Masse volumique [kg/dm³]	Proportion [% en masse]	Teneur [kg/m³]	Volume [l/m³]
Ciment	CEM II/B-M (T-LL) (Optimo 4)	3.03		330	109
Granulat	sable 0/4	2.68	38	731	273
	gravillon 4/8	2.68	7	135	50
	gravillon 8/16	2.68	5	96	36
	gravillon 16/32	2.68	0	0	0
	granulat de béton 8/16	2.55	50	916	359
Eau		1.00		158	158
Teneur en air					15
Adjuvant	fluidifiant		selon besoin (p. ex. 1–1.5 % en masse du ciment)		
Masse volumique et volume du béton frais				2366	1000
Rapport E/C			0.48		
Propriétés de béton sélectionnées: résistance à la compression [N/mm²]			40		
Module d'élasticité [N/mm²]			30 000		

Tab. 5.1.4: Exemple de formulation d'un béton de recyclage à granulat de béton pour une sorte de béton C (classes d'expositions XC4) et des propriétés de béton durci sélectionnées.

- Béton de recyclage à propriétés spécifiées pour des éléments porteurs: la teneur en composants R_c et R_b atteint au moins 40 %, selon SN 670 902-11-NA.
- Béton de recyclage à composition prescrite pour remblais, enrobage de canalisations et sous-couches: la teneur en composants R_c et R_b atteint au moins 80 %, selon SN 670 902-11-NA.

Le planificateur droit prendre les mesures suivantes pour respecter ces critères et prescriptions:

- Clarifier la disponibilité des sortes de béton de recyclage.
- Définir les éléments de construction réalisables en béton de recyclage et contrôler si le volume minimal est respecté par rapport au volume total de béton.
- Spécifier des sortes de béton de recyclage avec les quantités prévues dans le devis.

Fig. 5.1.12: Béton de recyclage à granulat de béton à l'état de béton frais.

5.2 Béton léger

5.2.1 Introduction

Le béton léger se distingue du béton courant par sa masse volumique réduite, obtenue grâce à l'ajout de granulats légers à haute porosité ou de faible masse volumique.

Les bétons légers se répartissent selon leur composition en différents groupes:

- le béton de construction léger (à structure compacte)
- le béton caverneux (sans composants fins)
- le béton léger poreux (béton mousse)
- le béton aéré

Le béton caverneux, le béton léger poreux et le béton aéré ainsi que tout béton d'une masse volumique inférieure à 800 kg/m^3 ne tombent pas dans le domaine d'application de la norme SN EN 206-1 et ne seront pas traités ici.

Béton léger de construction
Le béton léger de construction possède une structure compacte, fermée comme un béton de masse volumique normale (fig. 5.2.1). La faible masse volumique visée est obtenue par le remplacement partiel ou total des gravillons denses par un granulat léger poreux. Il est possible d'échanger en plus, le sable contre un granulat léger fin.

La propriété la plus essentielle d'un béton léger de construction est sa faible masse propre. Les éléments de construction en béton léger représentent, selon la classe de résistance à la compression, une économie entre 600 et 1000 kg/m^3 au niveau de la masse du béton.

Le béton léger se caractérise aussi par sa faible conductibilité thermique en comparaison avec un béton de masse volumique normale. Les bétons légers, dits isolants, avec des masses volumiques après séchage à l'étuve entre 800 et 1000 kg/m^3 sont non seulement compacts et de bonne capacité portante, mais présentent aussi des propriétés d'isolation thermique. Ils permettent de réaliser des murs monolithiques en béton de parement, sans doublage ni isolation périphérique additionnelle. Néanmoins, de tels murs sans isolation thermique supplémentaire nécessiteraient des épaisseurs importantes (env. 1.50 m) pour satisfaire les exigences d'isolation thermique (u ≈ 0.15). La masse volumique sèche du béton isolant ne peut être atteinte qu'avec des entraîneurs d'air spéciaux ou des agents moussants employés pour les bétons moussants.

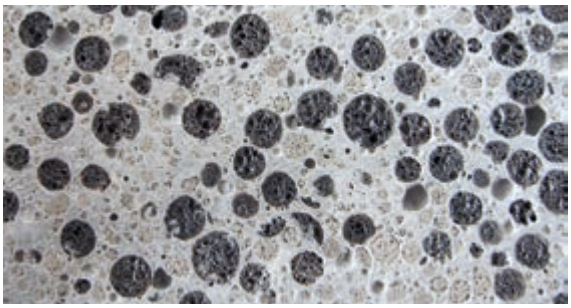


Fig. 5.2.1: Plaque polie d'un béton léger de construction avec une structure compacte.

La disponibilité des bétons légers doit être clarifiée à temps avec la centrale à béton.

5.2.2 Exigences normatives

Généralités
Le béton léger est un béton dont la masse volumique après séchage à l'étuve est inférieure à 2000 kg/m³.

Selon la norme SN EN 206-1, il est nécessaire de définir la résistance à la compression et la masse volumique pour le béton léger à propriétés spécifiées. En Suisse, on emploie principalement les bétons légers des classes de résistance à la compression LC 8/9 à LC 35/38 et des classes de masse volumique D1.0 à D1.8 (voir chapitre 2.3.2).

Les classes de résistance à la compression ne sont pas identiques pour le béton léger et le béton de masse volumique courante. Seules les valeurs de la résistance à la compression sur cylindres correspondent. Alors que les valeurs correspondantes de la résistance à la compression sur cube sont environ 10 à 13 % plus élevées pour le béton léger, elles sont 15 à 25 % plus élevées pour les bétons de masse volumique normale. Cette différence provient du comportement à la rupture différent du béton normal et léger. Dans le béton léger, les surfaces de rupture traversent le granulat léger, dès que la résistance du grain est dépassée. Ceci est accompagné d'une dilatation transversale inférieure en comparaison avec le béton de masse volumique normale. La différence entre la résistance à la compression sur cube et celle sur cylindre sera d'autant plus petite que la dilatation transversale du béton est faible.

Contrôles
La masse volumique du béton léger est déterminée selon la norme SN EN 12390-7 après séchage à l'étuve à une température de 105° C.

Le granulat a un grand pouvoir absorbant grâce à sa haute porosité et soutire à la pâte de ciment de l'eau dès le malaxage jusqu'à la prise. Cette absorption d'eau accélère le raidissement du béton frais.

L'absorption d'eau des gravillons légers doit être mesurée au préalable selon la norme SN EN 1097-6. Il est recommandé de ne tenir compte que de l'absorption d'eau des premières 60 minutes afin de ne pas surestimer l'absorption d'eau effective dans le béton léger, et de ne pas sous-estimer le rapport eau effficace/ciment. Pour le sable léger concassé, il faut seulement considérer 70 % de la valeur mesurée de l'absorption d'eau.

5.2.3 Technologie du béton

Ciment
Tous les ciments admis par la norme SN EN 206-1 sont aptes à la production de bétons légers. En cas d'éléments de construction ayant une section supérieure à 40 cm, il faut tenir compte du fait que le granulat léger peut freiner la dissipation de la chaleur d'hydratation. Par conséquent, les températures plus élevées au sein de l'élément de construction peuvent engendrer des fissures. Pour ces cas-là, il est recommandé de choisir des ciments à faible chaleur d'hydratation.

Granulat
Types de granulats
Les granulats typiques et fréquemment utilisés pour les bétons légers de construction sont l'argile expansée, le verre expansé, les gravillons de verre cellulaire et le tuf naturel (fig. 5.2.2 à 5.2.5). Il est aussi possible de les mélanger entre eux.

L'argile expansée est un granulat léger, très poreux, produit industriellement par cuisson d'argiles naturelles. L'argile est séchée, moulue puis expansée à une température proche de 1200° C. On obtient des perles poreuses de forme sphérique et à surface fermée. Selon le processus de production, les propriétés de l'argile expansée peuvent être adaptées à l'utilisation prévue.

Le verre expansé est un granulat léger, hautement poreux, qui est produit à partir de verre de recyclage. Le procédé de production consiste à broyer et mélanger finement les déchets de verre nettoyés pour obtenir une farine crue dont on forme le granulé cru. Ce granulé cru est fondu et expansé au four à une température d'environ 750–960° C. Le verre expansé est caractérisé par sa forme ronde (billes de verre) et sa surface fermée. Le diamètre maximal du granulat se situe à 4 mm.

Les gravillons de verre cellulaire sont produits à partir de verre de recyclage expansé à environs 900° C. Les gravillons se forment en se brisant sous l'effet de la fissuration engendrée par les tensions thermiques pendant un refroidissement à 300° C.

Fig. 5.2.2: Argile expansée.

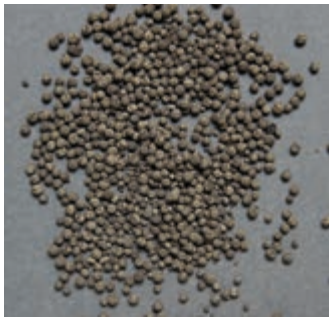
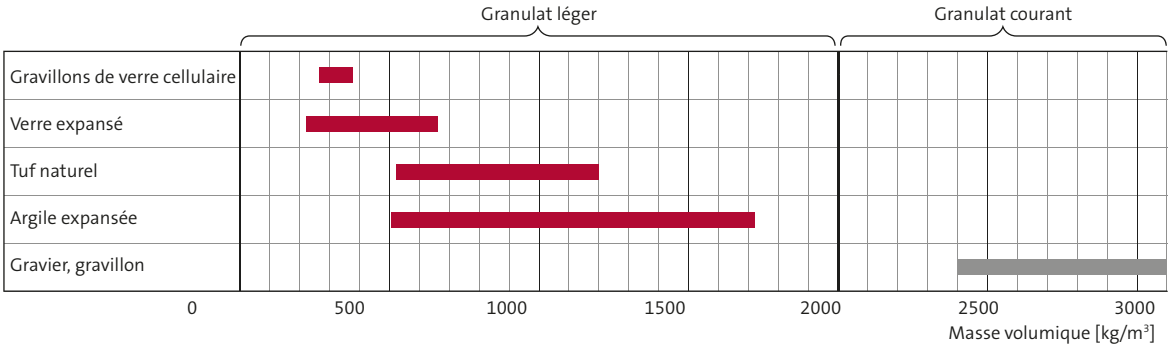


Fig. 5.2.3: Verre expansé.

Fig. 5.2.4: Gravillons de verre cellulaire.

Fig. 5.2.5: Tuf naturel.

Fig. 5.2.6: Domaines de masse volumique de quelques granulats légers et courants.



Le tuf naturel est une roche volcanique. Un grain de tuf naturel contient jusqu'à 85 % vol. d'air sous forme de pores finement dispersés. Normalement, le tuf naturel est concassé pour obtenir un diamètre maximal du granulat de 4 mm.

Masse volumique
La masse volumique des granulats légers varie en fonction de leur matière première et des procédés de fabrication (fig. 5.2.6).

Absorption d'eau
Le granulat léger présente une absorption d'eau d'env. 5 à 20 % plus élevée que celle d'un granulat naturel. Cette absorption d'eau peut accélérer le raidissement du béton frais. On évite cet effet en humidifiant au préalable le granulat, en allongeant la durée de malaxage et/ou en choisissant une consistance initiale plus molle.

Farine
Lors de l'utilisation d'un granulat léger, il faut veiller à obtenir une teneur suffisante en farine dans le béton. La teneur en farine peut être augmentée par une augmentation du dosage en ciment ou par un ajout d'additions.

Adjuvants
Le risque de ségrégation du béton léger peut être réduit et la cohésion du béton frais nettement améliorée par l'entraînement de pores d'air et l'ajout d'un stabilisateur. Les pores d'air entraîné contribuent également à réduire la masse volumique de la pâte de ciment. Dans le cas des bétons isolants (masse volumique ≤ 1000 kg/m³), la teneur en pores d'air s'élève à 15–25 % vol..

L'ajout de stabilisateur augmente la viscosité de la pâte de ciment de telle manière que le granulat léger ne peut plus remonter à la surface.

Ajouts
Dans les bétons légers, la faible teneur en farine des sables légers est complétée par un ajout d'additions. Ceci permet d'améliorer la cohésion interne du mélange, le degré de fermeture de la surface et ainsi, éviter des ségrégations.

Le remplacement partiel du ciment par des cendres volantes a l'avantage de réduire le développement de la chaleur d'hydratation qui est renforcée par la capacité d'isolant thermique du béton léger.

Consistance
Dans la pratique, les bétons légers des classes de consistance C1 à C3 ont fait leurs preuves. Les bétons isolants sont souvent mis en œuvre avec des classes de consistance F4 à F5. Il faut noter que la tendance à la ségrégation, faisant remonter le granulat à la surface, augmente avec des consistances très fluides.

Malaxage – transport – mise en place – compactage
Malaxage
Le granulat léger est normalement dosé de manière gravimétrique. Pour cela, la teneur en eau et la masse volumique en vrac doivent être surveillées régulièrement et prises en considération lors du dosage.

L'ordre d'introduction dans le malaxeur peut être optimisé en pré-mélangeant le granulat léger avec 2/3 de l'eau de gâchage et en ajoutant ensuite le ciment et le reste de l'eau. A ce moment, seuls les adjuvants liquides sont dosés afin qu'ils ne puissent pas être absorbés par le granulat et perdre leur effet. La durée de malaxage minimale recommandée pour un béton léger compact est de 90 secondes après l'adjonction de tous les composants.

En cas d'utilisation d'agents, moussants la durée de malaxage augmente jusqu'à 180–200 secondes.

Transport
Le transport dans le camion-malaxeur ne doit pas dépasser 30 minutes pour les bétons légers d'une masse volumique inférieure à 1500 kg/m³. En cas de durées de transport plus longues, des essais préliminaires sont nécessaires.

Mise en place
En règle générale, les bétons légers d'une masse volumique sèche supérieure à 1600 kg/m³ sont aptes au pompage. Par rapport à la hauteur des couches de remplissage du béton courant (50–70 cm), celle des bétons légers d'une masse volumique inférieure à 1500 kg/m³ doit être réduite d'environ 50 % (chapitre 3.4.4).

Compactage
Le béton léger exige un plus grand effort de compactage, à cause de la masse volumique plus faible et des granulats légers qui amortissent l'énergie de vibration. Le rayon d'action de l'aiguille vibrante étant réduite d'env. 30 à 40 %, il est nécessaire de rapprocher les points d'introduction de l'aiguille vibrante. La durée de vibration doit être adaptée à la consistance afin d'éviter que les granulats légers remontent à la surface (voir chapitre 3.5).

Cure
Il faut prévoir des délais de décoffrage plus longs (entre 24 h et 5 jours) et des mesures d'isolation thermique comme le recouvrement avec des nattes isolantes après le décoffrage en fonction de la composition du béton et de l'épaisseur de l'élément de construction. Ceci permet de réduire le risque de fissuration lié au gradient de température entre le cœur et la surface du béton. Le cas échéant des mesures sont à prendre pour diminuer le développement de la chaleur d'hydratation (voir chapitre 3.6).

5.2.4 Recommandations pour la planification du béton léger

Comportement structural
Le comportement structural du béton léger de construction est comparé à celui du béton de masse volumique courante dans la figure 5.2.7. Alors que dans le béton de masse volumique courante le flux de contraintes passe dans le granulat, il est dévié dans la pâte de ciment durcie dont la rigidité et la résistance sont plus élevées que celles du granulat léger.

Propriétés du béton durci
Résistance à la compression
La porosité du granulat (masse volumique) a une influence prédominante sur la masse volumique du béton: plus la masse volumique du granulat est faible, plus la masse volumique du béton léger sera faible. La résistance à la compression du béton léger dépend directement de la masse volumique du béton: plus celle-ci est basse, plus sa résistance à la compression sera faible (fig. 5.2.8).

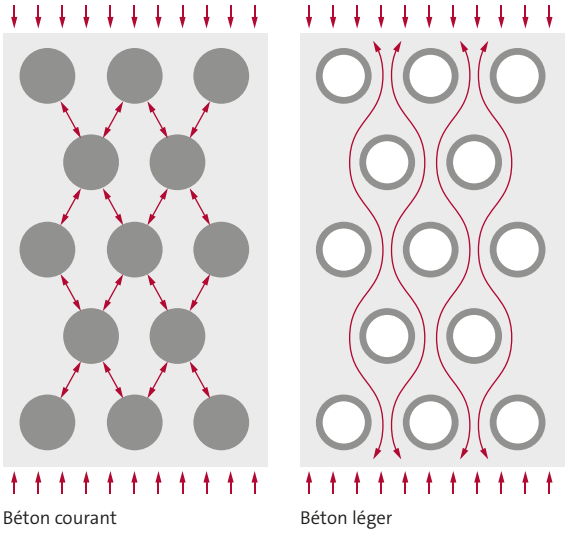


Fig. 5.2.7: Représentation schématique du flux de contraintes dans le béton courant (à gauche) et dans le béton léger de construction (à droite).

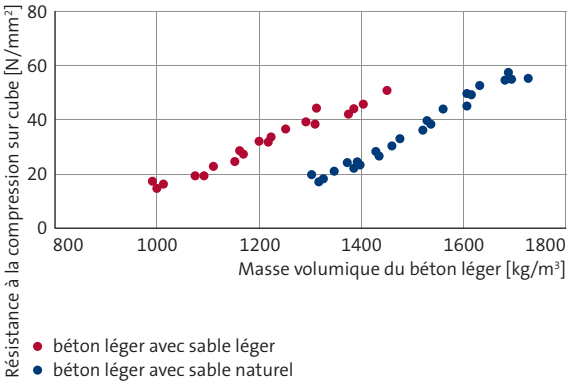


Fig. 5.2.8: Corrélation entre la résistance à la compression sur cube et la masse volumique après séchage à l'étuve d'un béton léger à argile expansée.

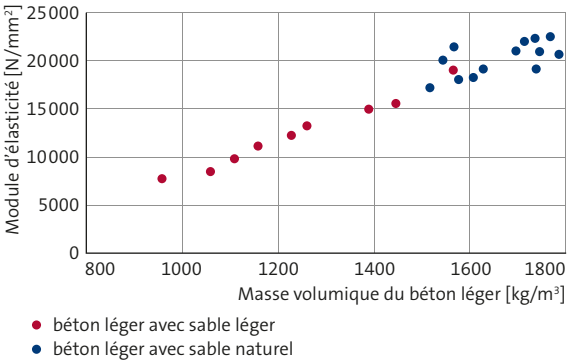


Fig. 5.2.9: Corrélation entre la masse volumique après séchage à l'étuve et le module d'élasticité de différents bétons légers.

Résistance à la traction
La résistance à la traction du béton peut être évaluée sur la base de la résistance à la compression (chapitre 3.8.2). Dans le cas du béton léger, la résistance à la traction doit être corrigée par un facteur de correction dépendant de la masse volumique selon l'équation 3.8.5:

$$\eta_l = 0.4 + 0.6 \left(\frac{\rho}{2200}\right)$$

η_l facteur de correction pour la résistance à la traction [-]
ρ masse volumique après séchage à l'étuve du béton [kg/m³]

Eq. 5.2.1

Module d'élasticité
Le module d'élasticité du béton léger dépend principalement du module d'élasticité des granulats et de celui de la pâte de ciment. Les valeurs usuelles du module d'élasticité du granulat léger varient entre 3000 et 18 000 N/mm² et n'atteignent qu'une fraction du module d'élasticité du granulat normal. En général, il est même inférieur à celui de la pâte de ciment. Selon le type de granulat léger, la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger, le module d'élasticité du béton léger de construction varie entre 5000 et 24000 N/mm². A résistances à la compression identiques, le béton léger présente un module d'élasticité 30 à 70 % inférieur à celui du béton normal.

Le module d'élasticité du béton léger diminue avec sa masse volumique. Cette dépendance est illustrée à la figure 5.2.9 pour différents types de bétons légers.

Le module d'élasticité du béton peut être évalué sur la base de la résistance à la compression (chapitre 3.8.3). Dans le cas du béton léger, il doit être corrigé par un facteur de correction dépendant de la masse volumique selon l'équation 3.8.8:

$$\eta_{lE} = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2$$

η_{lE} facteur de correction du module d'élasticité [-]
ρ masse volumique après séchage à l'étuve du béton [kg/m³]

Eq. 5.2.2

Retrait et fluage
Le retrait du béton léger est augmenté de 20 % à 50 % par rapport à celui d'un béton de masse volumique courante selon la norme SIA 262.

Pour le béton léger, les déformations de fluage peuvent être estimées selon la norme SIA 262. On appliquera un coefficient de fluage $\phi(t,t_0)$ multiplié par le facteur de correction η_{lE} (voir éq. 5.2.2).

Tab. 5.2.2: Exemples de formulations d'un béton léger de différentes classes de masse volumique ainsi que quelques propriétés sélectionnées.

			Béton léger classe de masse volumique D1.0		**Béton léger classe de masse volumique D1.2**		**Béton léger classe de masse volumique D1.8**	
Composant		**Masse volumique [kg/dm³]**	**Teneur [kg/m³]**	**Volume [l/m³]**	**Teneur [kg/m³]**	**Volume [l/m³]**	**Teneur [kg/m³]**	**Volume [l/m³]**
Ciment	CEM II/B-M(T-LL) (Optimo 4)	3.03	400		350		350	
Addition	cendre volante	2.24	200					
Granulat courant	sable 0/4	2.68			840		840	
Granulat léger	argile expansée		350		240		481	
Eau		1.00	210		185		175	
Teneur en air				200		70		50
Adjuvant	fluidifiant, entraîneur d'air, agent moussant		selon besoin					
Masse volumique et volume du béton frais			1160	1000	1616	1000	1846	1000
Propriétés de béton durci sélectionnées: résistance à la compression [N/mm²]			10		24		45	
Module d'élasticité [N/mm²]			6000		15 000		20 000	

Conductibilité thermique

La norme SIA 381/1 donne pour les bétons légers à base d'argile expansée des valeurs de dimensionnement du coefficient en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve (Tab. 5.2.1).

Masse volumique sèche ρ du béton léger [kg/m³]	Conductibilité thermique λ [W/mK]
1000	0.30
1250	0.50
1500	0.70
1700	1.00
2400 (béton armé)	1.80

Tab. 5.2.1: Conductibilité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve pour les bétons légers à base d'argile expansée et un béton courant (valeurs de dimensionnement selon la norme SIA 381/1).

Durabilité

La surface d'un béton léger compact peut présenter de nombreux pores et cavités d'une taille de plusieurs centimètres. Ils sont, en règle générale, sans influence négative sur la durabilité du béton. Il est recommandé d'employer un coffrage absorbant pour réduire la taille et le nombre des pores.

En outre, une protection par traitement hydrofuge des surfaces des éléments de construction exposés aux intempéries est recommandée lorsque la classe de masse volumique est inférieure à D1.2 (au plus tôt à l'âge de 28 jours). Ceci permet d'augmenter la résistance au gel du béton léger et simplifie en plus le nettoyage de la surface des salissures et graffitis.

Composition du béton

Le tableau 5.2.2 indique les compositions ainsi que quelques propriétés sélectionnées du béton durci pour différents bétons légers.

Fig. 5.2.10: Bétonnage d'un mur en béton léger.

5.3 Béton renforcé de fibres

5.3.1 Introduction

Le béton renforcé de fibres est un béton auquel on ajoute des fibres, généralement des fibres métalliques ou polymères (voir chapitre 1.5), au moment de la fabrication, afin d'améliorer le comportement structural et l'aptitude au service. Les fibres, enrobées dans la pâte de ciment durcie, agissent comme une armature. Dans des cas particuliers, les fibres sont additionnées pour améliorer les propriétés de béton frais, p. ex. la rigidité du béton jeune, l'augmentation de la résistance au feu ou la réduction du rebond du béton projeté. Le terme béton renforcé de fibres est aussi employé lorsque le diamètre maximal du granulat est inférieur à 4 mm. Le béton fibré à ultra-hautes performances est traité séparément au chapitre 7.3.

Les explications suivantes se limitent aux fibres courtes d'une longueur maximale de 50 mm. L'orientation des fibres dans le béton durci varie en fonction de la technique de mise en œuvre:

- dispersion spatiale régulière dans l'ensemble du volume du béton, y compris les surfaces, les arêtes et les angles
- orientation préférentielle en un plan (béton fibré projeté)

L'addition de fibres peut réduire l'ouverture des fissures par la formation d'une multitude de très fines fissures qui sont en général sans conséquences. De cette manière, le développement des fissures est fortement limité (fig. 5.3.1).

Lorsqu'une première fissuration s'est formée dans le béton, les fibres peuvent assurer la transmission des tensions et des forces dans la zone fissurée. A condition d'être suffisamment encastrées dans la pâte de ciment, elles relient les deux flancs de la fissure et entravent sa propagation. Elles agissent donc comme un frein à la fissuration (fig. 5.3.2).

L'origine des fissures dans le béton peut varier (voir chapitre 8.4). L'addition de fibres présente une mesure possible de prévention des fissures. Le tableau 5.3.1 récapitule l'emploi des fibres les plus couramment utilisées dans la pratique en fonction des causes de fissuration.

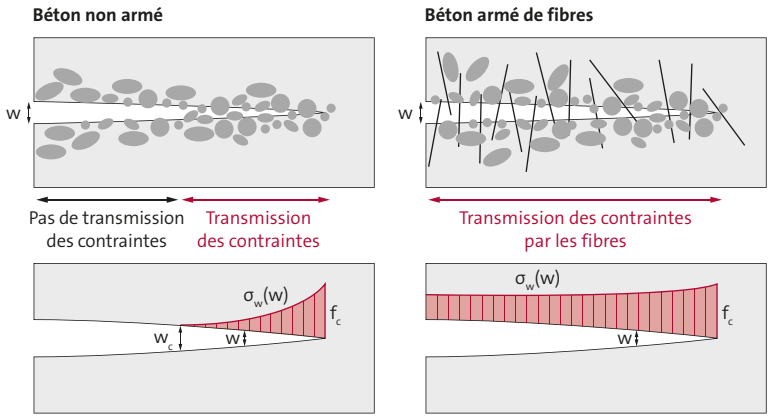


Fig. 5.3.2: Section fissurée d'un béton non armé et d'un béton renforcé de fibres avec la zone de transmission des contraintes lors de la fissuration initiale.

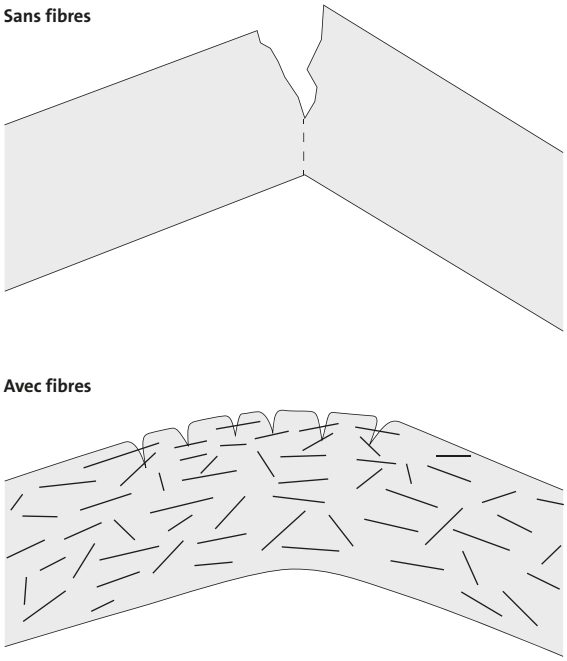


Fig. 5.3.1: Effet inhibiteur et dispersif des fibres en comparaison avec un béton sans fibres.

Application	Fibres métalliques	Macrofibres polymères	Microfibres polymères
Aptitude au bétonnage en pente	X		X
Rigidité du béton au jeune âge des éléments préfabriqués (tubings, tuyaux, éléments de canalisation)	X	X	
Retrait plastique			X
Retrait de séchage (éléments de construction étanches)	X	X	
Réduction du rebond du béton projeté en tunnel	X		
Augmentation de la ductilité des éléments de construction exposés à des sollicitations de choc (p. ex. collisions, explosions)	X		
Augmentation de la capacité portante (éléments de construction soumis à la fatigue)	X	X	
Amélioration de la résistance à l'abrasion	X		
Remplacement de l'armature statique (fondations, murs extérieurs de caves)	X		
Augmentation de la résistance au feu			X
Dalles de fondation sans joints, étanches	X		

Tab. 5.3.1: Champs d'application des différents types de fibres.

5.3.2 Exigences normatives

En principe, le béton renforcé de fibres doit remplir les exigences de la norme SN EN 206-1. En plus, il doit respecter les règles de la recommandation SIA162/6 «Béton renforcé de fibres métalliques». Les exigences complémentaires sont à spécifier; telles que le type de fibres (longueur, diamètre), leur dosage ou leurs propriétés mécaniques exigées, comme p. ex. la résistance effective à la traction par flexion f_{ctf} ou bien l'énergie de rupture G_f.

Selon la recommandation SIA 162/6, ces deux paramètres sont à déterminer expérimentalement par des essais sur dalle carrée ou circulaire en béton renforcé de fibres métalliques (fig. 5.3.3 et voir chapitre 5.3.4). Alternativement, la résistance effective à la traction par flexion peut être déterminée sur un prisme de flexion (SN EN 14651: éprouvette pour fibres métalliques).

Le calcul de la sécurité structurale du béton renforcé de fibres se base sur la résistance ultime de la section. De manière simplifiée, on tient compte de la contribution des fibres à la transmission des forces sur le côté en traction dans un bloc de contraintes (fig. 5.3.4).

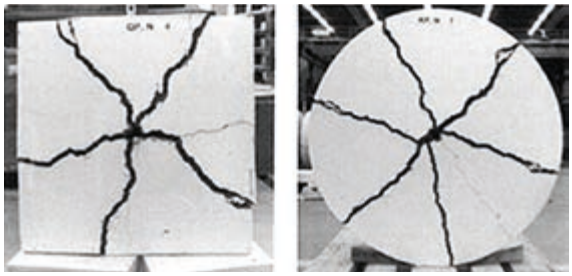


Fig. 5.3.3: Dalle carrée et circulaire en béton renforcé de fibres métalliques après l'essai selon SIA 162/6.

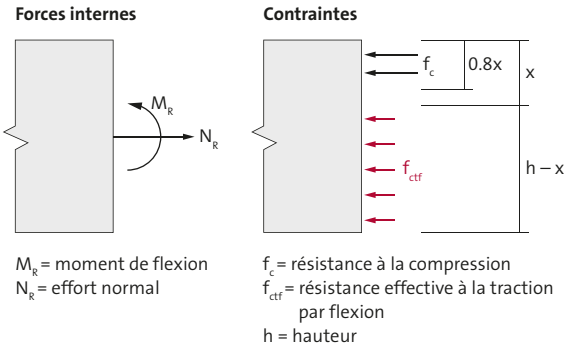


Fig. 5.3.4: Répartition des contraintes pour la détermination de la résistance ultime de la section selon SIA 162/6.

Un dimensionnement analogue pour les bétons renforcés de macrofibres polymères est recommandé jusqu'à l'introduction d'un règlement normatif en Suisse.

Le béton projeté renforcé de fibres possède selon la norme SN EN 14487-1 les propriétés supplémentaires et/ou complémentaires suivantes:

- classes de résistance résiduelle
- classes de la capacité d'absorption d'énergie

La résistance résiduelle, aussi appelée résistance post-peak, correspond à la contrainte calculée dans le béton renforcé de fibres en fonction de la flèche de l'éprouvette lors d'un essai de flexion. La capacité d'absorption d'énergie indique la quantité d'énergie qui peut être absorbée en chargeant une plaque renforcée de fibres (aire sous la courbe contrainte/flèche, voir fig. 5.3.9).

5.3.3 Technologie du béton

Généralités
La composition des bétons renforcés de fibres correspond généralement à celle des bétons pompés (voir chapitre 4.1). Les bétons renforcés de fibres montrent un besoin de pâte en ciment plus élevé pour un enrobage suffisant des fibres et pour une bonne finition de surface. La courbe granulométrique du granulat est plus riche en sable que celle d'un béton sans fibres. En règle générale, on choisit une consistance plastique à la mise en œuvre.

Les bétons renforcés de fibres métalliques pour des sols industriels armés possèdent des teneurs en fibres atteignant jusqu'à 35 kg/m^3. Les dosages plus élevés de 35 à 80 kg/m^3 ne sont employés dans la pratique que dans des cas particuliers, p. ex. lorsqu'une grande partie de l'armature minimale est remplacée par des fibres métalliques.

Les dosages habituels des fibres polymères varient entre 0.5 et 2 kg/m^3 pour restreindre le retrait plastique et 2 à 4 kg/m^3 pour améliorer la résistance au feu. Les macrofibres polymères sont dosées à raison de 3 à 10 kg/m^3 pour augmenter la capacité porteuse.

Ciment
En principe, tous les ciments admis par la norme SN EN 206-1 sont aptes à la production de béton renforcé de fibres.

Granulats
Le diamètre maximal du granulat peut influencer la répartition et l'orientation des fibres. Si la longueur des fibres est trop courte par rapport au diamètre maximal du granulat, les fibres seront écartées par le granulat et leur longueur sera insuffisante pour ponter de manière efficace les fissures entre les plus grands grains (fig. 5.3.5). Le diamètre maximal du granulat doit être adapté à la longueur des fibres, p. ex. pour le béton projeté il est souvent limité à 8 mm. Par contre, le béton renforcé de fibres pour les sols industriels et les surfaces de roulement peut être produit avec un granulat à diamètre maximal de 32 mm (longueur habituelle des fibres métalliques 60 mm). En général, la longueur de la fibre sera au moins 2 fois plus grande que le diamètre maximal du granulat. Un granulat concassé ou à granularité discontinue combiné à un fort dosage en fibres peut influencer négativement l'ouvrabilité du béton.

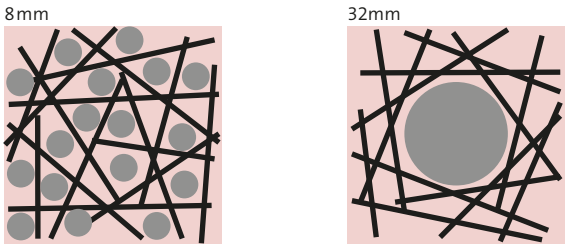


Fig. 5.3.5: Influence du diamètre maximal du granulat sur la répartition des fibres: à gauche distribution homogène des fibres et du granulat, à droite écartement des fibres par un granulat à diamètre maximal trop grand.

Malaxage
Les fibres sont ajoutées au béton frais pendant le malaxage. Il faut veiller à une bonne séparation des fibres et leur distribution homogène dans le béton frais. Il est avantageux de mélanger d'abord le béton et introduire les fibres par la suite. La durée de malaxage humide n'augmente pas en cas de fibres métalliques. L'addition des fibres dans le malaxeur principal de la centrale à béton assure une répartition optimale des fibres.

Les fibres peuvent aussi être ajoutées dans le camion malaxeur, en faisant tourner le tambour à haute vitesse pendant 5 minutes. Les fibres, pour des besoins statiques, ne doivent pas s'endommager, se plier ou se tordre pendant le malaxage. Si l'élancement des fibres (rapport entre la longueur et l'épaisseur) augmente, l'ouvrabilité diminue et la tendance à former des pelotes de fibres se renforce (fig. 5.3.7). Dans la pratique, on choisit un élancement des fibres l/d de 50–80.

Le dosage de grandes quantités de fibres est optimisé avec des équipements automatisés (fig. 5.3.8) qui facilitent le travail et permettent d'épargner du temps. Les fibres sont aussi livrées collées, en faisceaux qui se décomposent dans le béton frais ou en sachets solubles dans l'eau qui facilitent le dosage.

Fig. 5.3.6: Fibres métalliques dans le béton frais.

Fig. 5.3.7: Pelotes de fibres, formées par une séparation insuffisante des fibres lors de l'introduction au malaxeur et une formulation du béton inadéquate.

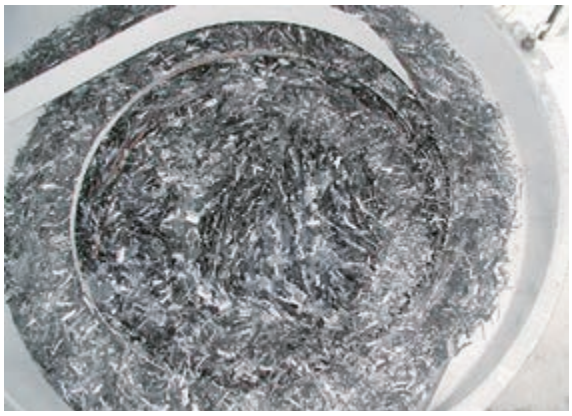


Fig. 5.3.8: Spirale de dosage pour les fibres métalliques.

Mise en place
La mise en place du béton renforcé de fibres est en principe identique à celui du béton courant. Le sol de fondation ne doit pas être gelé et doit montrer suffisamment de stabilité. La pose feuilles plastiques entre le sol compacté et la dalle de fondation, comme couche de séparation, rend l'emploi d'une couche de béton maigre souvent superflu. Dans le bâtiment, la dalle de fondation en béton renforcé de fibres est mise en place en une couche. Habituellement, on peut renoncer à une double nappe d'armatures, on déverse le béton directement du camion malaxeur dans le coffrage de la dalle. De plus, il est possible d'augmenter la cadence de mise en œuvre en choisissant des dimensions de plaques plus grandes. En cas de pompage du béton renforcé de fibres, le diamètre maximal du granulat sera limité en général à 16 mm. Il faut veiller à utiliser un diamètre du tuyau de pompage suffisamment grand (120 mm), et sans courbures, à cause du risque de bourrage.

Compactage
Les bétons à fibres nécessitent plus d'énergie de compactage que les bétons sans fibres. L'énergie de compactage nécessaire augmente avec la teneur en fibres. Les équipements habituels de compactage (règle vibrante ou lisseuse à ailettes) peuvent être employés.

5.3.4 Recommandations pour le dimensionnement du béton fibré

Comportement structural du béton fibré

Le béton sans fibres montre sous traction une rupture quasi subite lorsque la résistance maximale à la traction est atteinte (voir fig. 5.3.9, courbe bleue). L'effet structural des fibres métalliques dans le béton repose sur l'arrachement des fibres de la pâte de ciment. L'adhérence des fibres au moment de l'arrachement absorbe beaucoup d'énergie. De ce fait, les bétons renforcés de fibres développent une grande puissance de dissipation et montrent une ductilité élevée.

Le comportement structural du béton fibré est caractérisé par sa résistance post-fissuration. Au contraire du béton sans fibres, la résistance ne tombe pas à zéro en cas d'effort de traction ou de flexion, mais reste au niveau de la résistance résiduelle (fig. 5.3.9, courbe rouge). Après la première fissuration, les fibres reliant les fissures sont arrachées de la pâte de ciment. Une fois la résistance à la première fissuration dépassée, la courbe contrainte/déformation, aussi appelée courbe de travail, est fortement influencée non seulement par le comportement vis-à-vis de l'arrachement des fibres, mais aussi par le dosage en fibres. La résistance résiduelle est, en règle générale, plus basse que la résistance à la première fissuration du béton en cas de moyennes ou faibles teneurs en fibres, inférieures à la teneur nommée «sous-critique». Dans les bétons à dosage très élevé en fibres avec une teneur «sur-critique» en fibres, p. ex. les BFUP, la résistance résiduelle maximale peut même dépasser la résistance au moment de la première fissuration. Ce comportement est présenté plus en détail au chapitre 7.3.

Les facteurs les plus importants qui influent sur la résistance résiduelle sont multiples (tab. 5.3.2).

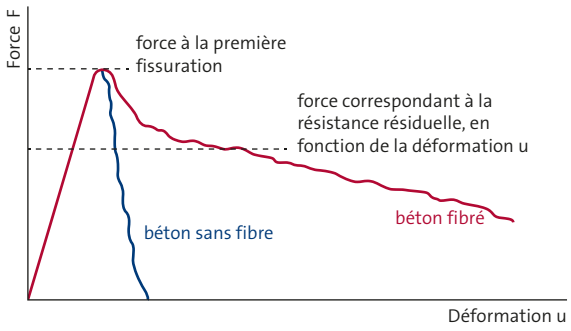


Fig. 5.3.9: Diagramme contrainte-déformation pour des bétons avec et sans fibres.

Les influences les plus importantes des fibres sur la résistance résiduelle	
Dosage	la résistance résiduelle augmente avec la teneur en fibres
Elancement des fibres	pour une longueur et un dosage identiques en fibres, la résistance résiduelle augmente, lorsque le diamètre des fibres diminue
Longueur des fibres	pour un rapport longueur/diamètre des fibres identique, la résistance résiduelle reste à un niveau plus élevé en cas de déformations plus grandes, lorsque la longueur des fibres augmente.
Adhérence entre les fibres et la pâte de ciment	la résistance résiduelle augmente avec l'adhérence des fibres à la pâte de ciment, tant qu'elle n'est pas trop élevée pour provoquer la rupture des fibres au lieu de leur arrachement
La résistance à la traction du béton	plus la résistance à la traction du béton est basse, moins les fibres seront nécessaires pour obtenir une résistance résiduelle élevée

Tab.5.3.2: Influence des fibres sur la résistance résiduelle.

Propriétés mécaniques

L'addition de fibres métalliques et de macrofibres polymères peut augmenter la résistance à la compression, plus que doubler la résistance à la traction et multiplier la résistance au choc ainsi que l'absorption d'énergie. Le module d'élasticité n'est que légèrement influencé.

Résistance effective à la traction par flexion f_{ctf}

La figure 5.3.10 montre les domaines de résistance effective à la traction par flexion f_{ctf} selon la norme SIA 162/6 en fonction du dosage des fibres polymères et métalliques. Elle met en évidence qu'un dosage de macrofibres polymères de 10 kg/m³ donnera une résistance à la traction par flexion à peu près identique à celle d'un dosage de 25 kg/m³ de fibres métalliques. Au contraire du béton

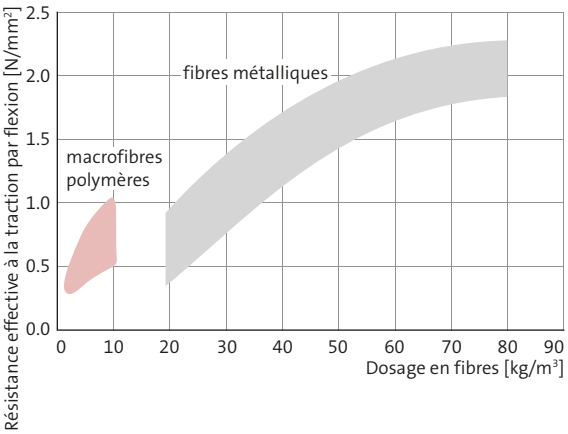


Fig. 5.3.10: Résistance effective à la traction par flexion f_{ctf} selon la norme SIA 162/6 pour différents types de fibres en fonction de leur dosage.

Fig. 5.3.11: Surface de rupture d'un béton renforcé de fibres métalliques.

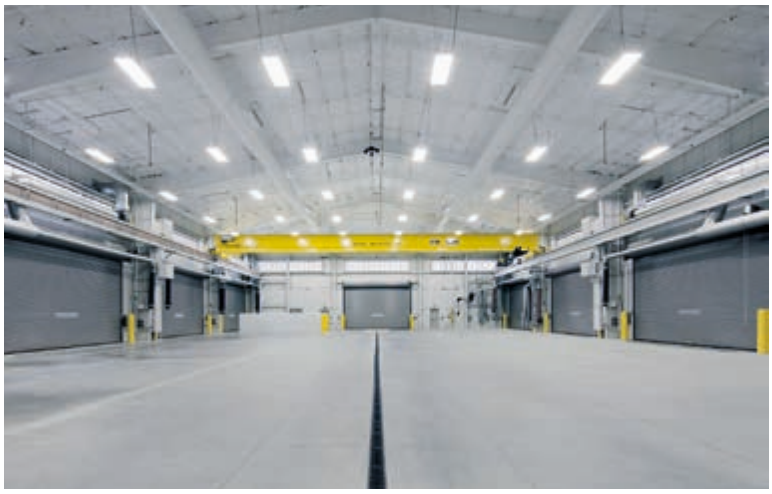


Fig. 5.3.12: Dalle en béton renforcé de fibres.
(Source: Bekaert (Suisse) SA).

renforcé de fibres métalliques, une augmentation du dosage en macrofibres polymères ne conduira pas à une élévation de la résistance à la traction par flexion.

Composition du béton
Le tableau 5.3.3 présente des compositions de béton et des résistances effectives à la traction par flexion f_{ctf} pour différents bétons renforcés de fibres.

			Béton renforcé de fibres, rés. eff. à la traction par flexion 0.5 N/mm²			Béton renforcé de fibres, rés. eff. à la traction par flexion 0.7 N/mm²			Béton r enforcé de fibres, rés. eff. à la traction par flexion 0.9 N/mm²		
		Masse volumique [kg/dm³]	Proportion [% en masse]	Teneur [kg/m³]	Volume [l/m³]	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		340	112		360	119		375	124
Addition	fibre métallique	7.85		25	3.18		30	3.82		35	4.46
Granulat	sable 0/4 gravillon 4/8 gravillon 8/16	2.68 2.68 2.68	48 15 37	887 277 648	331 103 255	45 15 37	886 277 683	330 103 255	48 15 37	881 275 679	329 103 253
Eau		1.00		180	180		174	174		172	172
Teneur en air					15			15			15
Adjuvant	fluidifiant		selon besoin								
Masse volumique et volume du béton frais				2393	1000		2409	1000		2417	1000
Rapport E/C			0.53			0.48			0.46		

Tab. 5.3.3: Exemple de formulation d'un béton renforcé de fibres pour différentes résistances.