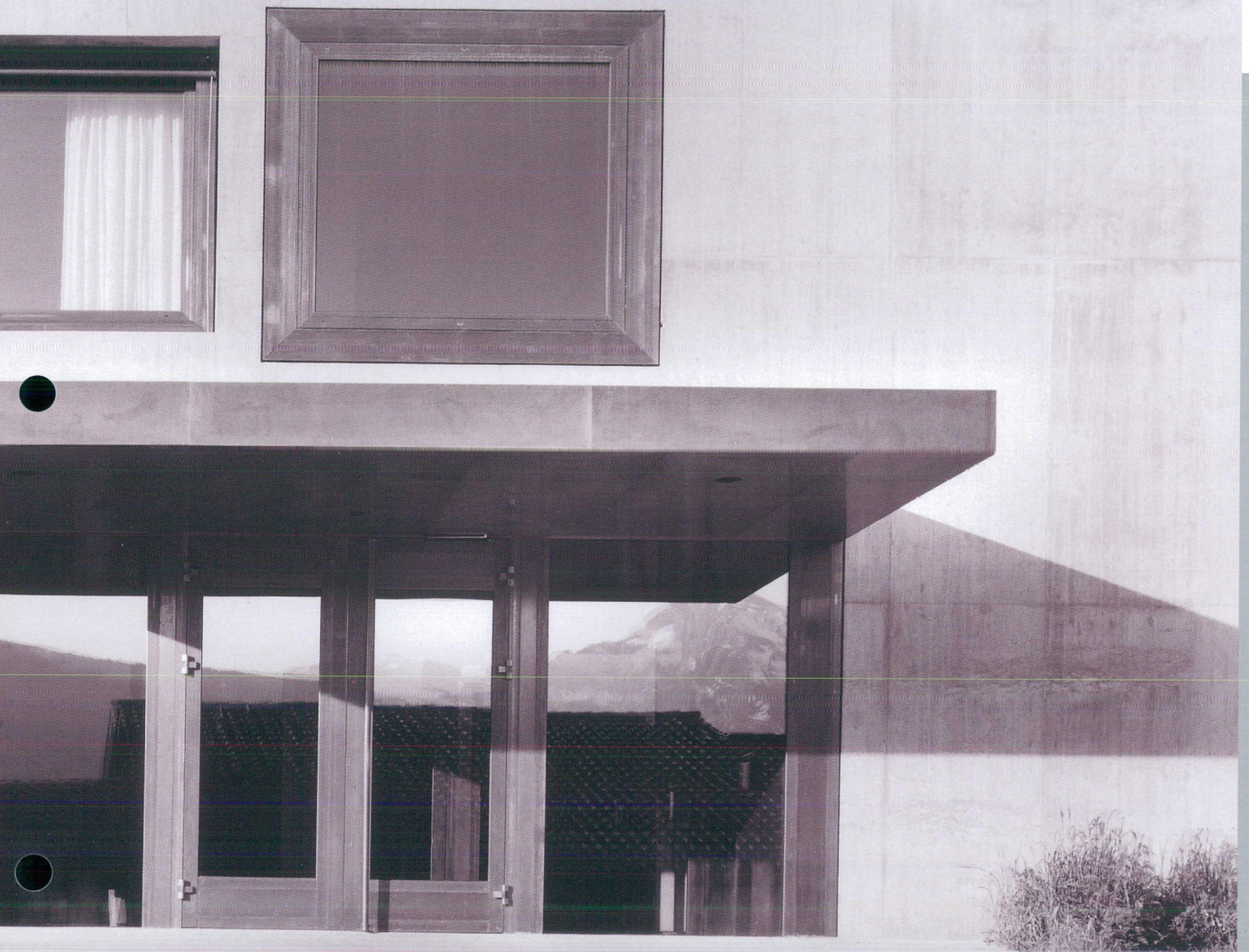
L'ASPECT EXTERIEUR DU BETON

L'âme du béton est cachée derrière une peau lisse de particules de ciment. Cette peau dissimule les tensions internes qui confèrent au béton sa portance et protège également le béton contre les agressions de l'environnement. Porteuse d'innombrables fonctions, elle délimite l'espace et enveloppe aussi bien des masses monolithiques que des formes sveltes, gracieuses ou osées. Elle veille à l'expression architectonique et plastique, révèle le jeu de la lumière et de la couleur, et confère au béton son raffinement décoratif. Divers architectes utilisent le béton apparent comme moyen de prédilection pour matérialiser leurs créations. Le béton apparent requiert cependant des connaissances spécifiques. Or, à la lumière de récents projets réalisés en Belgique, il semble que ces connaissances soient insuffisamment diffusées. Ce bulletin souhaite combler cette lacune. Dans cet article, nous ne parlerons que du béton prêt à l'emploi et laissé apparent. L'accent est mis surtout sur le béton lisse sans traitement ultérieur. Vous trouverez d'abord des informations sur la zone périphérique et la surface. Ensuite, nous formulerons diverses exigences en matière de composition, de coffrage, de mise en œuvre, etc. Le salissement des façades, un aspect important, n'est pas considéré dans ces pages; nous renvoyons à la littérature traitant de ce sujet[1,2].



béton coulé in situ
aspect

Ef2 (G1)

BB/SfB

GENERALITES

Zone périphérique du béton (zone de surface, peau du béton)

Le Beton-Verein [3] en Allemagne définit la zone périphérique comme la couche située entre la surface et le noyau du béton. L'épaisseur de cette couche est environ égale à la moitié du diamètre maximum des granulats (fig. 1).

Les caractéristiques de la zone périphérique diffèrent de celles du noyau, pour diverses raisons, dont la principale est l'effet de paroi sur le coffrage (fig. 3). Il s'agit d'un compactage moins dense des granulats à proximité d'une paroi. Cet effet témoigne également de ce que les composants du mortier sont progressivement plus fines dans les espaces entre les gros granulats et le coffrage, jusqu'à la surface où ne subsistent que les plus fines des particules (principalement du ciment).

Supposons que nous découpions le béton en fines tranches, parallèles à la surface. Si nous déterminons la composition de chaque tranche, à mesure que nous nous rapprochons de la surface, (fig. 4) [4]:

- le volume de granulats diminue;
- le volume de ciment durci augmente;
- le volume de 'particules fines' augmente;
- le rapport eau/ciment (rapport entre la teneur en eau et en ciment) croît (à condition que les parois de coffrage n'absorbent pas l'eau de gâchage).

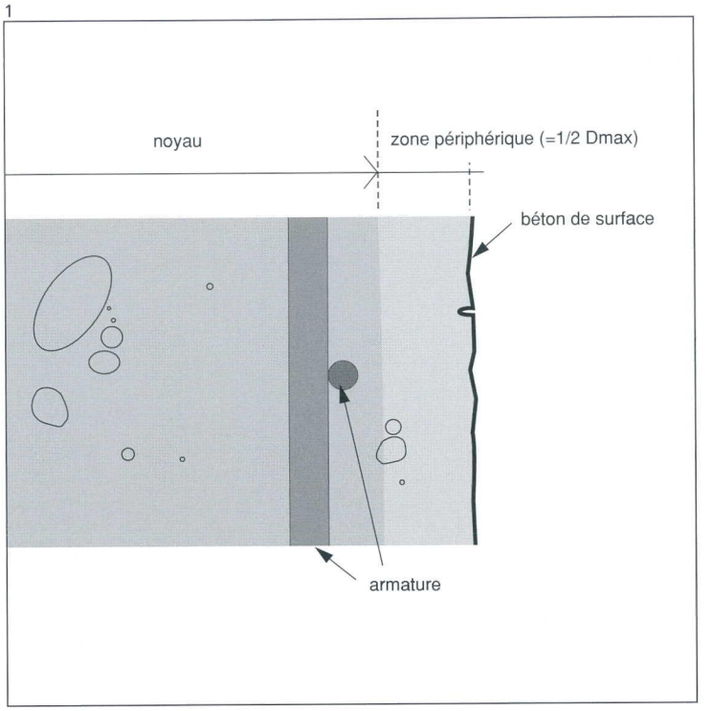
Lors d'une ségrégation du béton, les différences entre la zone périphérique et le noyau s'accentueront encore. Ce phénomène apparaît dans le mélange lorsque la structure granulaire n'est pas optimale et présente une cohésion insuffisante. La ségrégation (démélange) peut aussi être la conséquence d'une erreur lors de la mise en place ou du serrage (voir plus loin). Lorsque la cohésion disparaît, les substances solides descendent dans le béton sous l'effet de la gravité, tandis que l'eau et les particules fines se déplacent vers le haut. Une fine couche d'eau peut éventuellement apparaître en surface (ressuage). La pression horizontale du mortier engendre un mouvement horizontal entraînant les particules fines et l'eau vers les parois de coffrage.

Le traitement du béton après sa mise en place joue également un rôle. Si, après le décoffrage, la zone périphérique n'est pas protégée contre la dessiccation, la quantité d'eau restante risque d'être insuffisante pour réagir avec le ciment. L'arrêt prématuré de cette réaction rendra la zone périphérique plus poreuse et donc moins durable que le noyau.

De plus, des phénomènes spécifiques se manifestent dans la zone périphérique. Suite à la teneur en ciment plus élevée, l'hydratation y engendre plus de chaleur et plus de retrait chimique et plastique que dans le noyau. Une température et un gradient d'humidité trop importants peuvent entraîner une fissuration.

Le fait que la composition et, partant, les caractéristiques de la zone périphérique diffèrent de celles du noyau est une donnée physique. Par ailleurs, la qualité de la zone périphérique dépend de la cohésion du mélange et des différentes phases de mise en œuvre. Elles déterminent la perméabilité finale du béton et donc sa durabilité (voir encart 'Perméabilité').

1



2

1.
Noyau, zone périphérique et surface.

2.
Vue intérieure du pavillon de conférence de Weil-am-Rhein de l'architecte Tadao Ando.

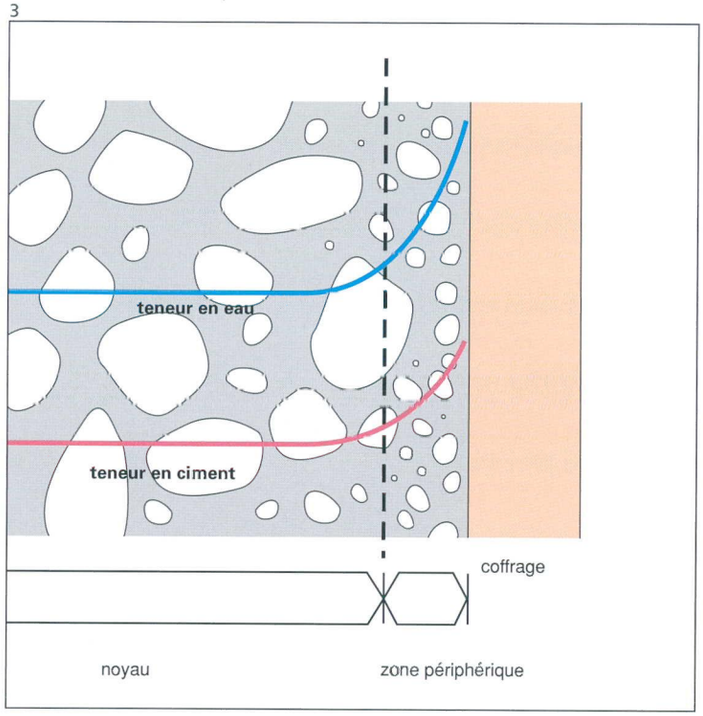
3.
Effet de paroi.

4.
Composition du béton sur 5 mm de profondeur à partir de la surface. Moyenne de 3 types de béton : E/C = 0,5, 0,45 et 0,4. D'après le Prof. Kreijger[4].

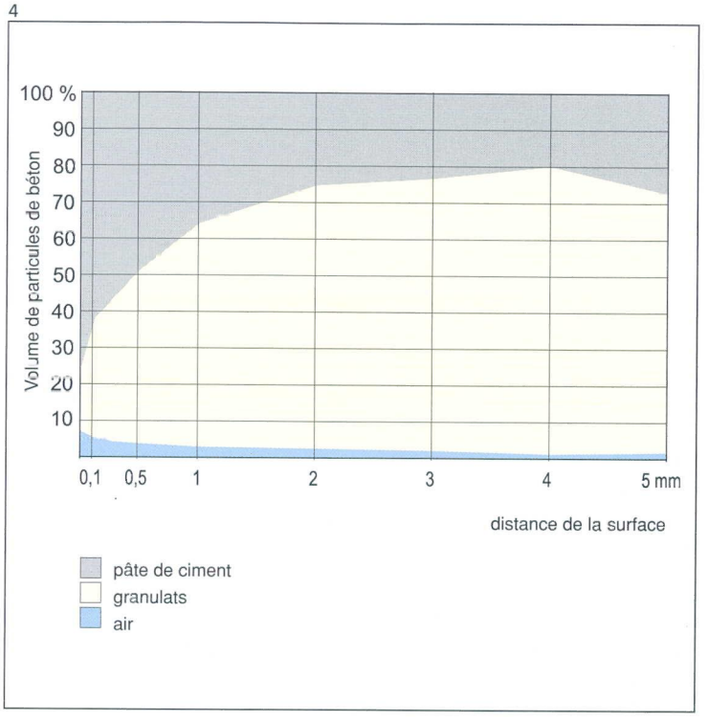
5.
Relation entre perméabilité et durabilité (résistance aux agents agressifs, gel, encrassement, etc.).

6.
Zone d'échange d'humidité limitée à ±2 cm.

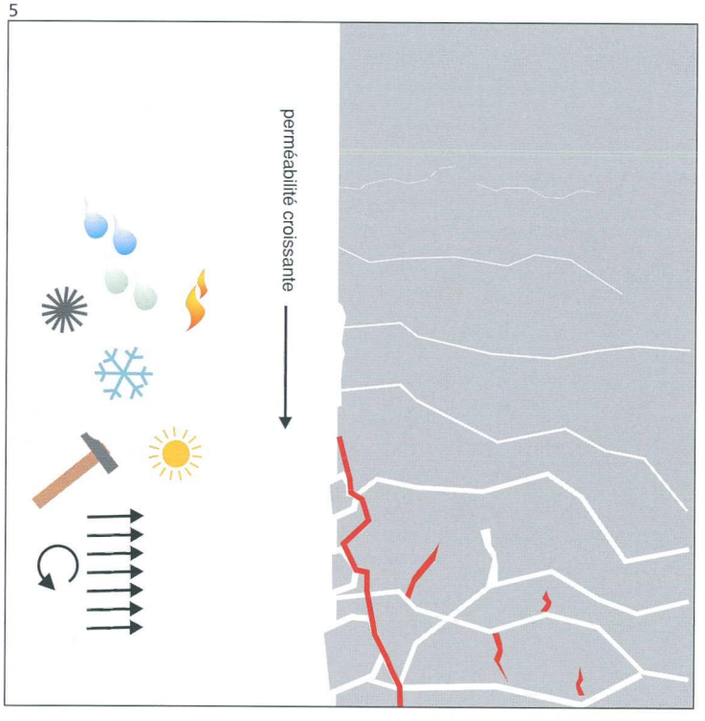
3



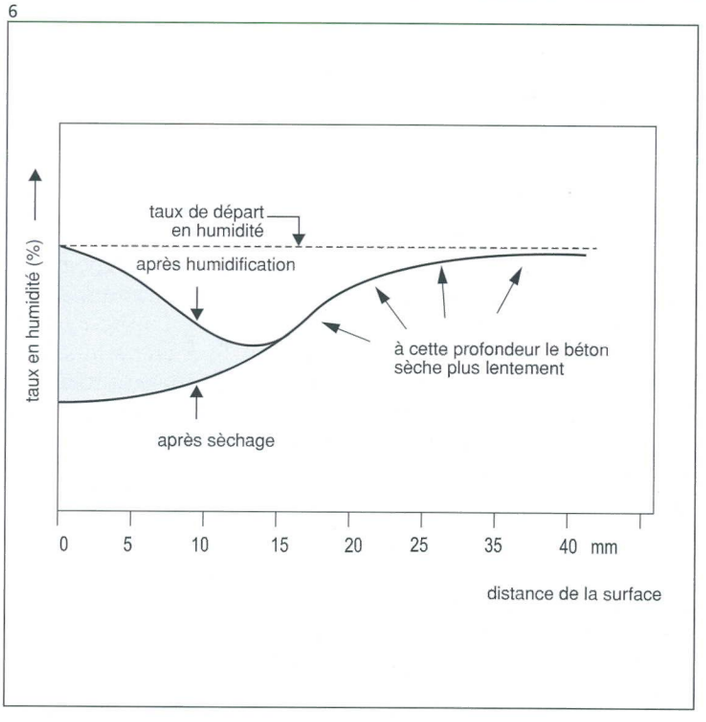
4



5



6



PERMEABILITE

On utilise le terme de 'perméabilité' pour indiquer la facilité avec laquelle les 'fluides' pénètrent et se propagent dans le réseau poreux d'un matériau. Le système de pores du béton est un réseau de cavernes petites à très petites. Plus les pores sont fins, plus la pénétration de substances agressives est difficile, et leurs effets néfastes réduits. En d'autres termes, plus le réseau des pores est étroit, plus le matériau est durable. Puisque cette pénétration se fait via la peau de ciment et la peau de béton, c'est leur perméabilité qui détermine la durabilité du béton (fig. 5). L'importance de la zone périphérique est évidente lorsqu'on sait que le déplacement d'humidité (le séchage et l'humidification) d'un béton compact et peu perméable se fait principalement dans la couche extérieure sur une épaisseur de 2 cm (fig. 6) [18].

Il existe un lien entre le rapport eau/ciment (le rapport de masse entre la quantité d'eau et de ciment) et le diamètre moyen des pores. Un faible rapport eau/ciment entraîne la formation de pores d'un petit diamètre, donc une moindre perméabilité et une plus grande durabilité. C'est pourquoi la norme prescrit que le rapport eau/ciment doit baisser lorsque l'agressivité de l'environnement sur le matériau augmente. La norme NBN B15-001 décrit donc plusieurs classes d'exposition et des critères de durabilité pour chacune des classes (ainsi qu'un rapport eau/ciment maximum). Voir plus loin l'encart *'Voici comment prescrire un béton apparent'*.

Par l'effet de paroi, le rapport eau/ciment est toujours plus élevé dans la zone périphérique que dans le noyau. Pour éviter que ce rapport n'augmente encore localement, la mise en œuvre et la cure doivent être exécutées avec le plus grand soin.

Surface du béton (peau, peau de ciment)

La surface du béton est riche en ciment

La qualité de la surface du béton est déterminée par les mêmes paramètres que ceux qui régissent la qualité de la zone périphérique. Toutefois, la surface est particulière en raison de sa haute teneur en ciment. En guise d'exemple, nous renvoyons à la figure 4, dont il ressort que la peau de trois types de béton est composée de 72 % (±10 %) (v/v) de ciment durci et de 23 % (±10 %) (v/v) de particules ultrafines!

Couleur (tonalité de gris)

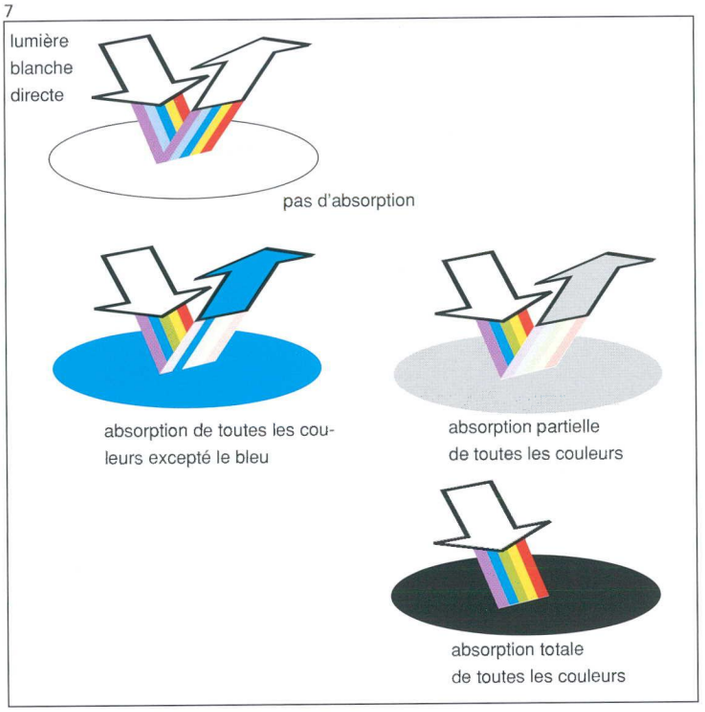
Parmi les éléments qui déterminent la couleur ou la teinte de la surface de béton, le ciment est le plus significatif. Qu'est-ce donc que la couleur ? La lumière tombant sur une surface est 'blanche'. Lorsque la surface contient des éléments qui absorbent la lumière incidente, la lumière réfléchie ne contient plus toutes les longueurs d'ondes. Nous percevons dans ce cas la lumière réfléchie comme colorée (fig. 7). Par exemple, la surface prend une couleur rouge lorsqu'elle absorbe tous les rayons du spectre lumineux à l'exception de ceux dont la longueur d'onde est comprise entre 660 et 760 millimicrons.

Lorsque tous les rayons sont intégralement réfléchis ou absorbés, nous sommes en présence d'une situation particulière. Dans le premier cas, la surface paraît blanche, dans le deuxième, noire. Lorsqu'une fraction identique de la lumière incidente est absorbée pour chacune des longueurs d'ondes, apparaît un ton gris. L'importance de cette fraction dépend de la nature du matériau absorbant et de la structure de la surface. Ainsi, plus ceux-ci varient, plus les tons gris varient également. Voir l'encart 'La teinte grise en surface du béton' pour de plus amples informations.

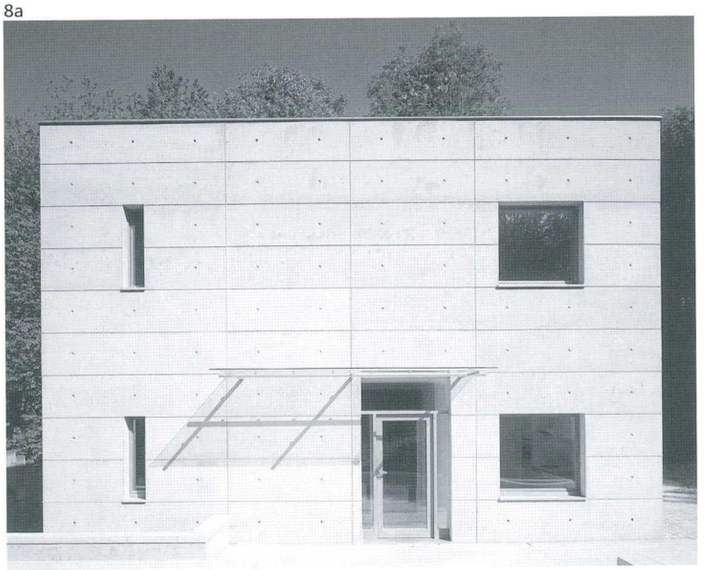
Texture

La texture est déterminée par la nature des parois de coffrage et l'éventuelle cure de la surface. Nous ne parlerons pas ici de la cure de surface[6, 7, 8]. Le béton destiné à être laissé bien en vue possède une surface lisse éventuellement avec le tracé des joints de coffrage et les trous de tirants. Une surface à structure particulière s'obtient en apposant sur les parois du coffrage une doublure (peau de coffrage) structurée (fig. 9).

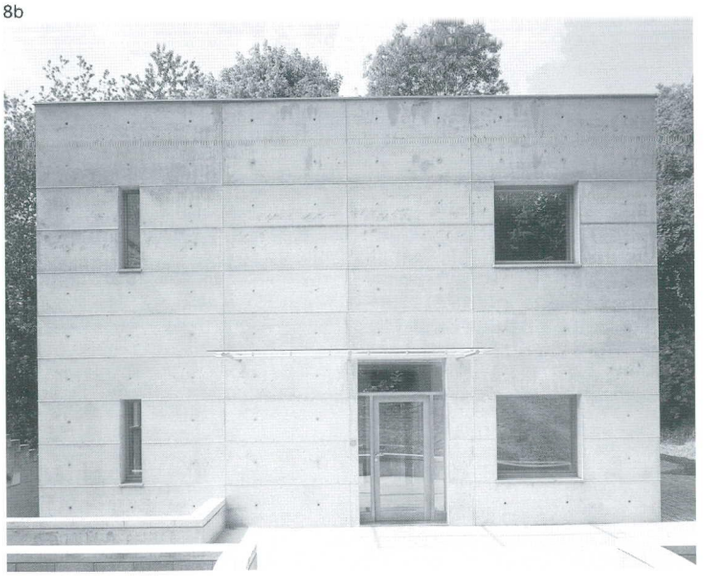
7



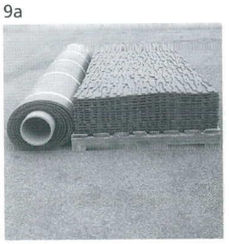
8a



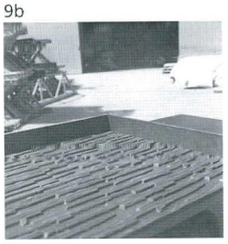
8b



9a



9b



9c

7.
Lumière et couleur.

8a, 8b.
Façade de la maison Wuidar (architecte Charles Vandenhove).
Influence de l'ensoleillement sur la teinte grise.

9a, 9b, 9c.
Exemple de peau de coffrage structurée.

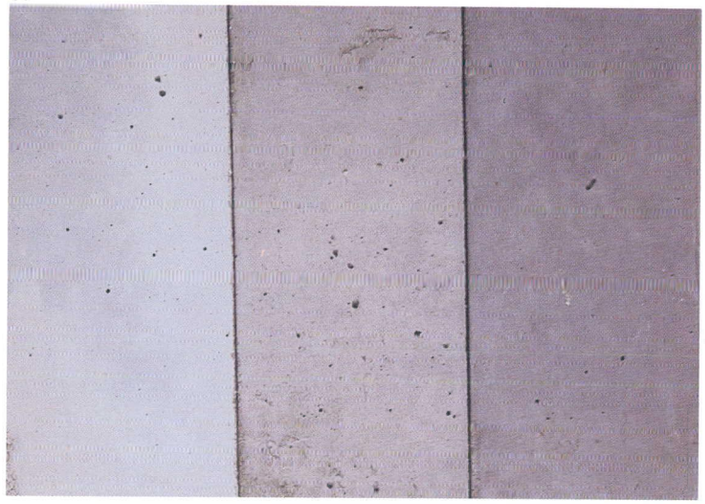
10

	plus clair ←	plus foncé →
Ciment Portland .....:	teneur en oxyde de fer faible	teneur en oxyde de fer élevé
Ciment de haut fourneau.....:	teneur en laitier élevée	teneur en laitier faible
Rapport eau/ciment .....:	élevé	bas
Matériau de coffrage.....:	peu absorbant	très absorbant
Surface de coffrage .....:	lisse	rugueuse
Temps de décoffrage	court	long
Exsudation de chaux .....:	importante	faible
Evolution dans le temps....:	jeune	âgé

10.
Influence de quelques paramètres sur la couleur grise.

11.
Influence du ciment sur la couleur grise :
à gauche : CEM III/C (81 à 95 % de laitier de haut fourneau)
au centre : CEM III/A (36 à 65 % de laitier de haut fourneau)
à droite : CEM I (95 à 100 % de clinker).

11



LA TEINTE GRISE EN SURFACE DU BÉTON

La teinte grise en surface du béton varie en fonction des facteurs suivants (fig. 10):

(1) *Nature des constituants :*

– *le ciment non hydraté* (fig. 11).
Le ciment Portland est plus foncé lorsqu'il contient plus d'oxyde de fer ; le ciment de haut fourneau est plus clair lorsque sa teneur en laitier augmente.

– *le ciment hydraté.*
Le ciment s'éclaircit en passant à l'état hydraté. Le degré d'hydratation et son évolution dans le temps influencent donc la teinte finale. Parfois, la surface après décoffrage présente une légère couleur vert-bleue. Cette couleur est due à l'utilisation de ciment de haut fourneau, et plus particulièrement de la présence des sulfures de fer et de manganèse. Au contact de l'air, ceux-ci s'oxydent et deviennent ensuite incolores.

autres particules fines.
Il s'agit de la fraction la plus fine du sable et des additifs, ayant chacun une teinte de gris spécifique. (Les pigments ne sont pas pris en considération.)

– *exsudations de chaux*[19, 10].
L'hydratation s'accompagne de libération de 'portlandite' $Ca(OH)_2$. Une partie de cette 'chaux libérée' aboutit dans les pores. Sur le front humide (où l'eau et l'air se rencontrent) la chaux entre en contact avec l'air et réagit avec le gaz carbonique (CO_2) en formant du carbonate de calcium ($CaCO_3$) qui précipite. Tant que cette précipitation a lieu dans les pores, aucun dépôt blanc n'apparaît en surface. Si la chaux libre est amenée vers la surface par l'eau en migration, et qu'elle précipite là après réaction, un voile blanc apparaît.

(2) *Variation de la composition à la surface de béton.*
Puisque chaque constituant possède une teinte de gris spécifique, toute modification de la *composition du béton* en surface entraîne une *modification de la teinte de gris.* C'est pourquoi la composition doit être maintenue aussi constante que possible et toute ségrégation doit être évitée pendant la mise en œuvre. La cohésion du mortier ne peut pas être perturbée par un déversement ou un serrage négligents.

(3) *Variation de la densité à la surface de béton.*
Une variation de la densité provient d'une variation dans la composition, plus particulièrement *de modifications dans le rapport eau/ciment.* Là où ce rapport est élevé, le réseau de pores est constitué de pores plus grands. A cet endroit, la surface de béton est donc moins dense. La plus grande perméabilité y fait suinter davantage de chaux et le béton y prend une teinte plus claire. Aux endroits ayant un rapport eau/ciment peu élevé, le béton est plus dense et la surface est plus foncée parce que le suintement de chaux y est moindre (ou absent). La surface ne peut donc s'éclaircir de manière uniforme que lorsque le flux et le dépôt de chaux sont uniformément répartis (donc lorsque le rapport eau/ciment et la densité sont constants).

Attention au contact de la pluie sur le béton fraîchement placé et décoffré (infiltration entre le coffrage et le mortier, flaques, etc.). La chaux y suintera davantage jusqu'à saturation de l'eau présente, puis y précipitera.

(4) *Variation de la capacité d'absorption des parois de coffrage.*
Aux endroits où l'eau de gâchage est absorbée par les parois de coffrage, le rapport eau/ciment baisse et la surface est plus sombre. Voir également le paragraphe 'Exigences posées en termes de coffrage'.

(5) *Variation de la rugosité de surface.*
Une surface plus rugueuse présente généralement une teinte plus sombre. Une partie de la lumière incidente est en quelque sorte emprisonnée dans les zones en retrait de la surface, de sorte que la réflexion de celle-ci est réduite.
Il y a souvent un rapport avec la granulométrie. La surface d'un béton à gros granulats est souvent plus rugueuse et paraît dès lors plus sombre.
C'est pourquoi il y aussi un rapport avec la composition. Plus celle-ci varie, plus la rugosité de surface varie et les variations de gris augmentent.

(6) *Nombre, taille et forme des petits creux et trous en surface.*
Chaque petit trou ou creux constitue une tache sombre sur la surface de béton. Ils ne peuvent être évités totalement, mais leur nombre et leur taille peuvent être réduits.

(7) *Evolution dans le temps.*
La perception de la teinte de gris varie dans le temps. La lumière incidente varie, le processus d'hydratation se poursuit, le voile de chaux se dissout, le degré d'humidité de la surface varie, la part de lumière réfléchie varie suite à l'érosion de la surface, des particules de poussière s'incrustent.

VOICI COMMENT PRESCRIRE UN BÉTON APPARENT:

Donnée de base A: *choisir la classe de résistance:*

généralement C25/30 ou C30/37 (si le béton est exposé à l'extérieur)

Donnée de base B1: *Choisir le domaine d'utilisation:*

indiquer si le béton est non armé, armé ou précontraint

Donnée de base B2: *Choisir la classe d'exposition:*

1 (intérieur)
ou 2a (environnement humide sans gel)
ou 2b (environnement humide avec gel)
ou 3 (environnement humide avec forte exposition à l'eau, gel et agents de déverglaçage)
ou 3S (environnement humide avec exposition modérée à l'eau, gel et agents de déverglaçage)
ou 4a (environnement marin sans gel)
ou 4b (environnement marin avec gel)
(ou 5a, 5b, 5c - environnement chimiquement agressif - faible, modéré, fort).

Donnée de base C: *Choisir la classe de consistance :*

généralement F3 (mais à convenir avec l'entrepreneur, en fonction de la complexité de l'élément, la densité du ferraillage, le mode de mise en place et la technique de compactage, etc.)

Donnée de base D: *Choisir la dimension maximame du granulat (Dmax):*

Dans la série 7, 10, 14, 20, 28, 32, 40 mm et
En tenant compte des conditions suivantes (plus sévères que dans la NBN B15-001):

Dmax ≤ 0,2 x la plus petite dimension de l'élément à bétonner,
≤ distance entre les armatures
≤ enrobage minimum des armatures.
Il est défini selon la classe d'exposition et augmenté d'une tolérance
Δh : 5 mm < Δh < 10 mm.

Classe d'exposition	*1*	*2a*	*2b*	*3 et 3S*	*4a*	*4b*
*Enrobage minimum pour béton armé (mm)**	*15*	*20*	*25*	*40*	*40*	*40*
*Béton précontraint**	*25*	*30*	*35*	*50*	*50*	*50*

* valeurs d'enrobage uniquement valables pour le béton prêt à l'emploi, non pour le béton préfabriqué

Données complémentaires E

- Teneur, caractéristiques (et provenance) des divers éléments constitutifs restent constants
- Rapport E/C maximum : 0,5
- Teneur minimum en ciment : 320 kg/m³
- Les granulats sont propres, ne contiennent pas de grains ferrugineux ni de composants organiques.
- Teneur en ions chlore < 0,4 % de la masse de ciment (pas d'adjuvants chlorés)
- Granulométrie: continue
- Teneur en particules fines (≤ 0,250 mm; y compris sable fin, ciment, additions, etc.) en fonction du calibre maximum du granulat

Calibre maximum du granulat (mm)	Teneur conseillée en particules fines (≤ 250 µm) en kg/m³
7	525
14	450
20	425
28	400
32	400

EXIGENCES EN TERMES DE COMPOSITION, DE FABRICATION ET DE TRANSPORT

Il faut éviter l'utilisation d'un mortier présentant une cohésion trop faible ou trop forte. Dans le premier cas, il y a danger de ségrégation ; dans l'autre, la mise en œuvre peut s'avérer difficile. Le béton idéal présente un faible retrait et un rapport eau/ciment peu élevé, une granulométrie continue et une teneur élevée en mortier contenant suffisamment de particules fines.

La norme NBN B15-001 permet à l'utilisateur de spécifier les performances souhaitées du béton ou de prescrire un béton répondant à des caractéristiques spécifiées. Notre bulletin numéro 19[9] vous informe davantage sur cette norme. L'utilisateur indique cinq données de base ainsi que des données complémentaires. Voyez l'encart à la page précédente pour la prescription d'un béton apparent porteur de la marque BENOR.

Les plastifiants et superplastifiants doivent faire l'objet d'un essai préalable, afin de vérifier s'ils ne causent pas une variation de la couleur. Les entraîneurs d'air diminuent le risque de ressuage; une augmentation du nombre de pores de surface ne doit cependant pas être exclue. L'adjonction de cendres volantes peut également être à l'origine des différences de couleurs.

Un contact préalable entre la centrale de béton, l'entrepreneur et l'architecte est souhaitable. Il faut convenir de l'aspect visé (texture et teinte), du temps de transport, de la précision dans les dosages, des contrôles éventuels, etc. La centrale à béton doit être suffisamment proche du chantier. Le temps entre le chargement et la mise en place ne peut pas excéder 100 minutes et est pour chaque livraison maintenu autant que possible constant. Il est préférable que le béton soit mélangé au préalable dans la centrale (temps de malaxage constants!) et transportés en camion agitateur. Afin de limiter tant que se peut le risque de ségrégation, le transport se fera idéalement au moyen de petits camions (6 m^3).

12a

12b

12.
Influence de la paroi de coffrage.
12a.
Surface rugueuse et mate (panneau de coffrage utilisé : planche en bois brut).
12b.
Surface lisse et brillante (panneau de coffrage utilisé : panneau en acier).

EXIGENCES POSEES EN TERMES DE COFFRAGE

Construction du coffrage

Le coffrage est constitué de parois de coffrage fixées sur une construction de soutènement. Cette construction est généralement réalisée en acier ou en aluminium, éventuellement combiné au bois. Les parois de coffrage déterminent la forme et la texture finales et influencent la teinte de la surface. C'est donc l'architecte qui choisit le matériau des parois de coffrage.

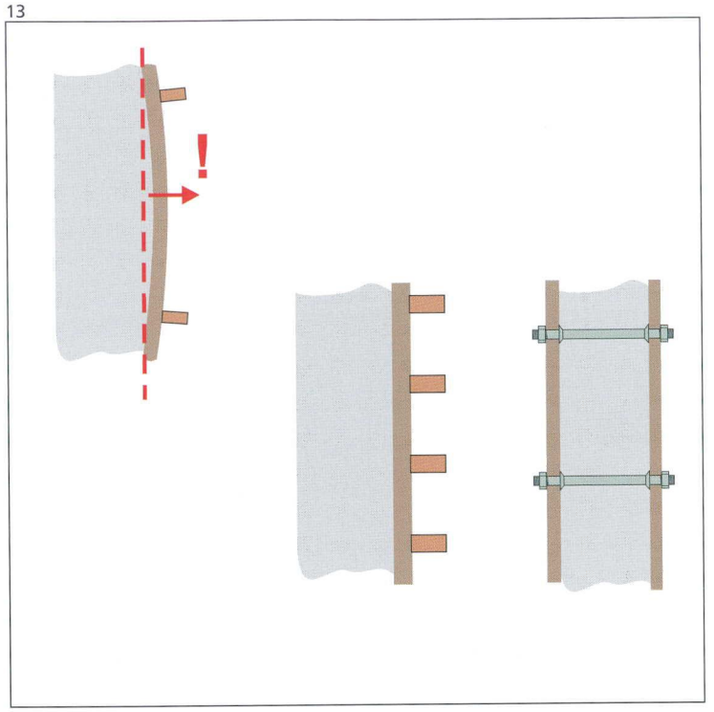
Parois de coffrage

Les matériaux les plus répandus sont les planches (de bois brut ou raboté, assemblées en plaques ou non), les plaques multiplex (enduites ou non), l'acier et le plastique. Moins fréquents sont les panneaux de fibres comprimées, les panneaux agglomérés et les autres panneaux de fibres.

L'absorption d'eau est un paramètre important. Les planches et les plaques en multiplex non enduites absorbent une part de l'eau de gâchage qui se dépose sur la surface de contact. Si la quantité absorbée est faible et répartie régulièrement, l'effet est positif (fig. 12a). Le rapport eau/ciment diminue, ce qui rend la peau en ciment plus solide et durable et moins sujette à retrait. Elle présente également moins de craquelures ou de fissures dues au retrait. L'absorption réduit aussi la ségrégation légère de la surface de contact, prévient la formation de nuages de particules fines et réduit ainsi les variations locales de teintes. Une capacité d'absorption irrégulière engendre par contre une variation du rapport eau/ciment, et donc des différences de teintes. Lorsque les parois de coffrage ont servi quelques fois, leurs pores se bouchent et l'absorption est moindre. Il faut donc éviter de mélanger des plaques déjà utilisées fréquemment avec des plaques moins utilisées ou neuves. Les panneaux trop absorbants ne conviennent pas. L'eau restante dans la peau de ciment serait insuffisante pour l'hydratation et la peau 'brûlerait'. L'absorption peut toujours être réduite au minimum en mouillant abondamment les parois de coffrage. Si l'on utilise simultanément des plaques mouillées et des plaques sèches, il faut s'attendre à des divergences dans la finition.

L'acier et le plastique n'absorbent pas d'eau. L'absorption des plaques multiplex dépend des caractéristiques du revêtement protecteur des plaques et de la durabilité de ce revêtement. Une plaque non absorbante peut très bien devenir légèrement absorbante au bout d'un nombre de cycles d'utilisation. Entre le coffrage et le béton se forme un mince film d'eau. Ce film se sature en chaux amenée par les pores. Après le décoffrage, cette chaux se dépose en surface sous la forme de carbonate de calcium et produit un ton de gris plus clair. (Voir l'encart *'La teinte grise en surface du béton'* et le bulletin n° 5 pour de plus amples informations sur les dépôts de chaux[19]). Ce film d'eau participe également à rendre la surface lisse, brillante, souvent un peu réfléchissante (fig. 12b). Une telle surface réfléchissante se ternit rapidement lorsqu'elle est exposée à l'air extérieur. Etant donné le rapport eau/ciment élevé, la peau de ciment est plus sujette à retrait, la formation de fissures est plus probable. Vu la finition très lisse, les fissures et variations locales de teintes seront plus visibles.

13



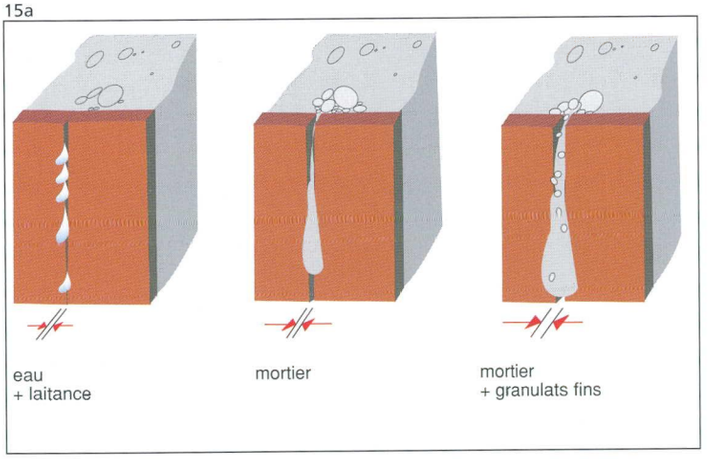
13.
Chaque déformation de la paroi de coffrage laissera des traces.

14

14.
Exemples de quelques panneaux de coffrage.

15a, 15b.
Les fuites entre les panneaux de coffrage se marquent en surface.

15a



15b

Les parois de coffrage doivent être suffisamment solides, stables et rigides (fig. 13). Si elles sont trop flexibles, elles se déforment sous les sollicitations de la masse de mortier et des vibrations lors du serrage. Il s'ensuit une ségrégation, des variations locales et des différences de teinte. Les parois de coffrage doivent aussi être propres (toute impureté laisse une trace) et de grande stabilité dimensionnelle (conforme aux tolérances). Toutes les planches ou plaques doivent être entreposées dans des conditions similaires et avoir un degré d'humidité identique.

Lors de l'utilisation de planches ou de plaques multiplex neuves (fig. 14), il y a un risque de lessivage de certaines substances du bois (comme les résines) ayant un effet retardateur sur l'hydratation du ciment. Il s'ensuit une augmentation de la concentration en sable à la surface et des variations de teinte. Aussi, le revêtement de finition des plaques peut, lors d'une première utilisation, dégager des substances qui produisent des taches. Il est donc parfois intéressant d'utiliser une ou deux fois ces parois de coffrage au préalable, ou de causer un 'vieillissement' artificiel en enduisant la surface d'un lait de ciment (rapport eau/ciment entre 0,8 et 1,0). Peu après l'application, il faut enlever la pâte de ciment à l'eau ou au moyen d'une brosse. Autre avantage : cette pâte bouche en partie les pores, ce qui permet de produire une surface de béton plus régulière.

Joints de coffrage et joints de reprise

Le coffrage doit être étanche (fig. 15). Toute fuite se remarque sur la surface finie. Selon la taille de l'ouverture, il y aura fuite d'eau, de pâte de ciment ou de mortier. Les joints de coffrage constituent des fuites potentielles. A l'endroit du joint fuyant, la peau possède un rapport eau/ciment moins élevé, et la quantité de particules fines diminue. Il en résulte une bande sombre ayant une texture brute et irrégulière (bavures). Un tel défaut est inadmissible. Les joints de coffrage doivent donc être bien ajustés. Des joints ouverts sans contre-latte (en l'absence de solive ou de poutre à l'arrière du joint) ne sont pas admissibles.

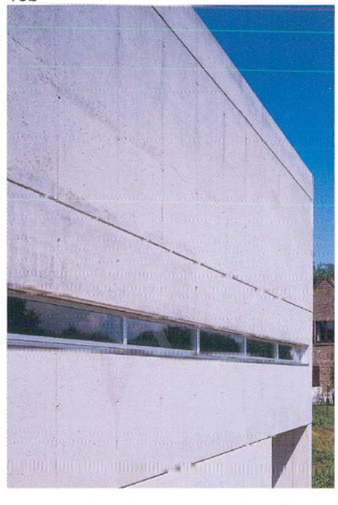
Produire un béton apparent sans aucune trace de joints est presque impossible, à moins d'utiliser des parois de coffrage en acier. C'est pourquoi il est préférable de concevoir une façade en tenant compte des marques visibles que laisseront les joints (fig. 16, 17, 18). Il est plus intéressant, en termes de prix, d'adopter comme mesure de base une dimension standard disponible dans le commerce.

Un joint de coffrage ouvert, bien ajusté et fermé d'une contre-latte se bouche vite une fois que l'eau et les particules fines l'ont infiltré. Il en résulte une surface de qualité homogène avec des marques nettes. Il est possible aussi de remplir les joints d'un matériau élastique, comme une bande de mousse, de caoutchouc ou du mastic. Le matériau doit toutefois bien adhérer, être souple, compatible avec le produit de décoffrage et résister aux alcalins.

L'utilisation d'une latte profilée (fig. 19) produit une marque plus franche. La latte doit cependant avoir une forme facile à décoffrer. Lors du décoffrage, il est conseillé de laisser la latte en place dans le béton. Cette latte se retire plus facilement du béton une fois le bois rétracté, et le risque d'effritement est moindre. La latte ne peut cependant tenir que faiblement à la paroi de coffrage. Lors de la détermination de l'épaisseur d'enrobage de l'armature, il faut tenir compte de la profondeur du profil.

16a

16b

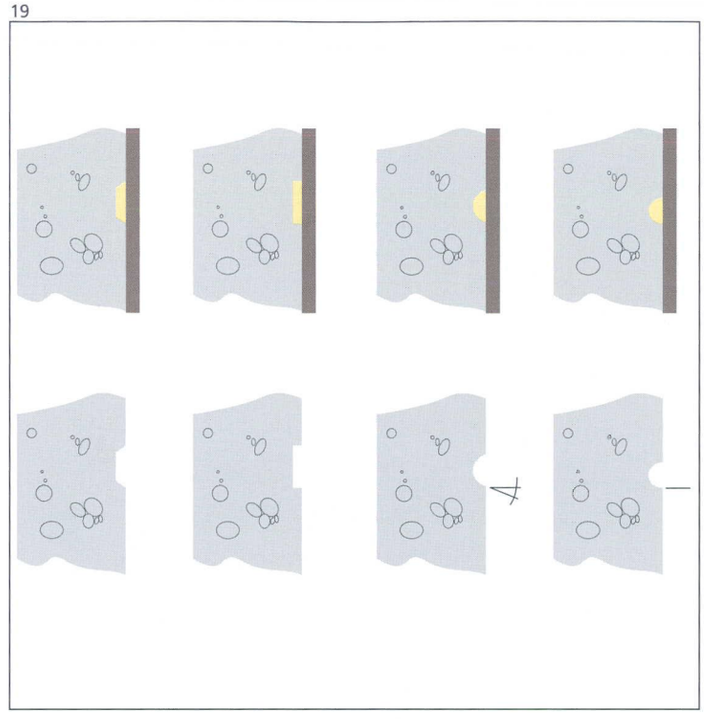


16a.
Maison de Rhode-Saint-Genèse de l'architecte Joël Claisse.
16b.
Vue d'un fragment de façade montrant les marques légères des joints de coffrage et les joints profilés de reprise.

17.
Immeuble de bureaux à Heerlen de l'architecte Wiel Arets.

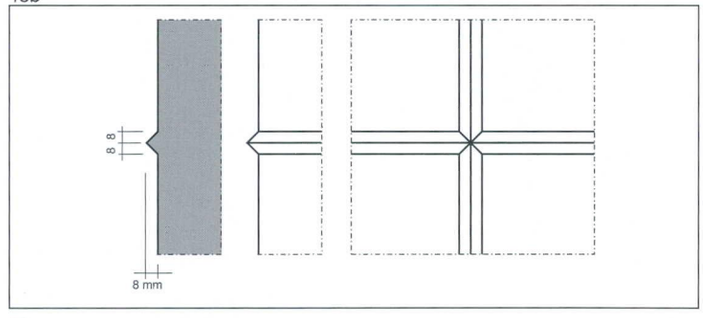
17

19



18a

18b

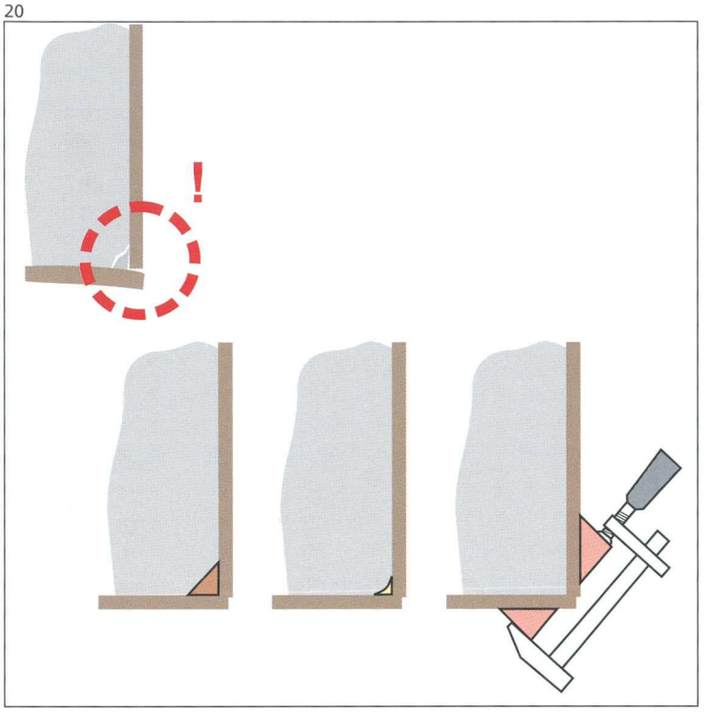


18c

18a, 18b, 18c.
Au niveau de la façade de la maison Wuidar, les joints de coffrage sont traités de manière saillante.

19.
L'utilisation de lattes profilées à bords latéraux obliques est préférable.

20



21a

Les joints d'angle (fig. 20) méritent une attention particulière. Durant la mise en œuvre et le serrage du béton, naissent des sollicitations qu'il est difficile de compenser au moyen de tirants. Il faut donc détailler le plan de coffrage afin d'éviter que ces sollicitations ne forcent les joints. Une solution consiste à utiliser une latte d'angle ou une bande en matière plastique. Les architectes refusent souvent de recourir à ce procédé pourtant élégant, parce que les coins sont alors biseautés. Il est difficile de produire des arrêtes d'angle bien franches. Les meilleurs résultats s'obtiennent en utilisant un coffrage d'acier dont les angles sont arrondis au minimum [10].

Les joints de reprise (fig. 21a) sont inévitables ainsi que leur marquage. Deux solutions sont possibles : cacher le joint de reprise (par exemple en les prévoyant dans une zone d'ombre) ou accentuer le joint par un profilage en retrait. Il est très difficile de reprendre les forces à la hauteur d'un joint de reprise. Une méthode élégante consiste à fixer le coffrage à l'élément de béton fraîchement décoffré (fig. 21b). Les tirants serrés dans les trous existants veillent à l'étanchéité du coffrage. Cette manière de procéder a une incidence sur le rythme des traces de joints de coffrage et de reprise. Il faut donc en tenir compte au préalable.

20.
Reprise des forces à hauteur des joints d'angle.

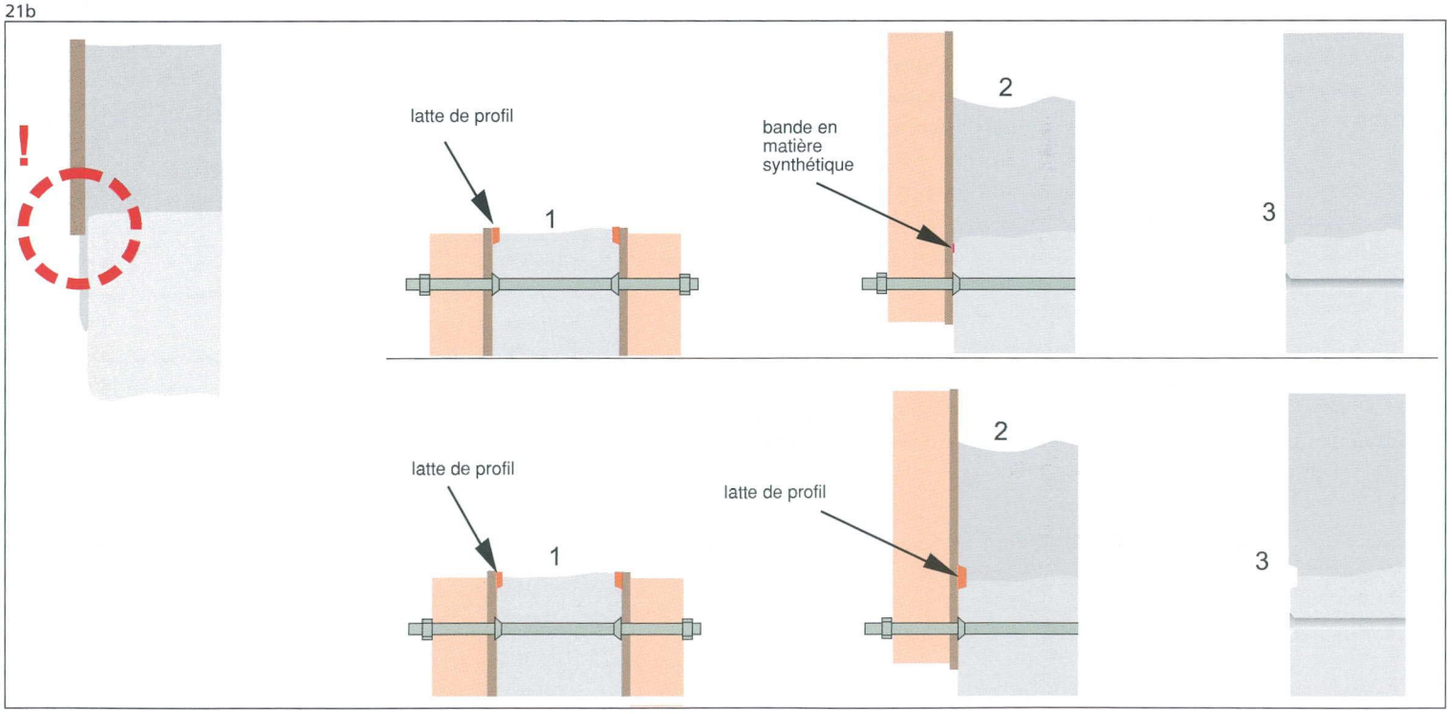
21a, 21b.
Reprise des forces à hauteur des joints de reprise.
Exemple : façade de la maison Wuidar (architecte : Charles Vandenhove).

22a, 22b, 22c.
Trous de tirant et leur fermeture.

23a.
Panneau de coffrage de la firme Cometal, inspiré de l'architecture de Tadao Ando.

23b.
Vue intérieure du pavillon de conférence de l'architecte Tadao Ando à Weil-am-Rheim.

21b



Trous de tirants, écarteurs, etc.

Les tirants (fig. 22) sont nécessaires pour reprendre les pressions horizontales du béton. Après le retrait des tirants et de leurs embouts coniques, il reste des trous, que l'on peut remplir de mortier ou d'isolant (laine minérale) et fermer au moyen de bouchons collés ou d'une plaquette de finition. Il est quasi impossible de remplir les trous coniques de mortier sans laisser de marques. Il est conseillé de tenir compte de l'articulation et de la finition des trous de tirants dès la conception.

Il est dommage que l'emplacement de ces trous, tels qu'ils sont prévus dans la plupart des systèmes de coffrage, n'est déterminé que par l'efficacité de reprise des sollicitations, sans considération pour l'aspect visuel. Cometal, seul producteur belge de coffrages, fait néanmoins exception à la règle : cette firme propose des panneaux inspirés de l'architecture de béton de Tadao Ando (fig. 23).

Si le cahier des charges ne permet pas de traces de tirants, les forces horizontales doivent être compensées au moyen d'étançons appuyés sur la structure du coffrage.

Produit de décoffrage

Le produit de décoffrage doit être choisi en fonction de la capacité d'absorption des parois de coffrage. Un essai préalable est indiqué. Pour les parois très absorbantes, il est conseillé d'utiliser une émulsion d'huile en phase aqueuse. Pour les autres, on obtient de bons résultats avec les huiles minérales contenant des agents tensioactifs et avec les nouveaux produits à base de cire[11, 12]. Pour les parois non absorbantes, les produits qui doivent sécher après leur application, ont la préférence[13].

Une utilisation incorrecte entraîne des taches et des variations de teinte. Les produits apposés à la main laissent souvent des traces de balayage. Les produits de décoffrage liquides doivent être pulvérisés sur le coffrage, puis étalés au moyen d'un chiffon. Le produit doit être appliqué en fine couche uniforme. Sur une couche plus épaisse, les salissures se fixent plus facilement, et s'incrusteront ensuite dans le béton. Il y a aussi un risque croissant de pores de surface.

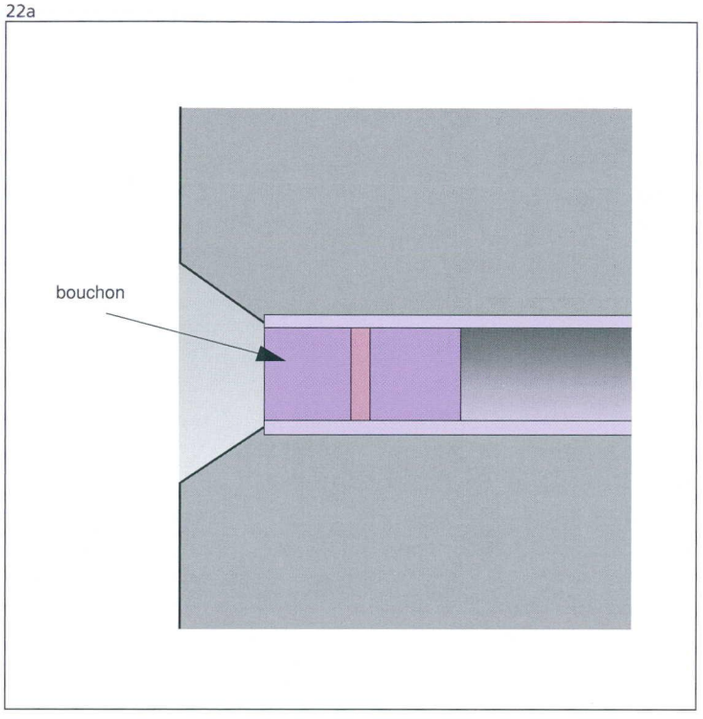
Armature

La tendance est aux constructions élancées. Si une telle construction doit porter une charge importante, il faut un taux d'armatures élevé. La combinaison de murs étroits et d'une armature importante complique la mise en place et le serrage du béton. Il y a donc plus de risque de ségrégation et, de ce fait, de différences de teinte et d'irrégularités.

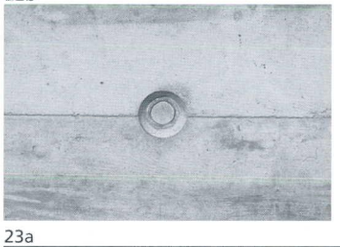
La distance entre les barres d'armature doit être supérieure au calibre maximum des granulats. Il faut protéger de la pluie les barres en attente pour éviter des taches de rouille sur le béton apparent. De plus, des particules de rouille sur le fond du coffrage provenant de l'armature se verront sur la surface du béton apparent.

Il faut utiliser suffisamment d'écarteurs, de préférence dans un matériau à base de ciment.

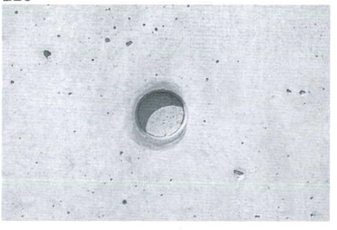
22a



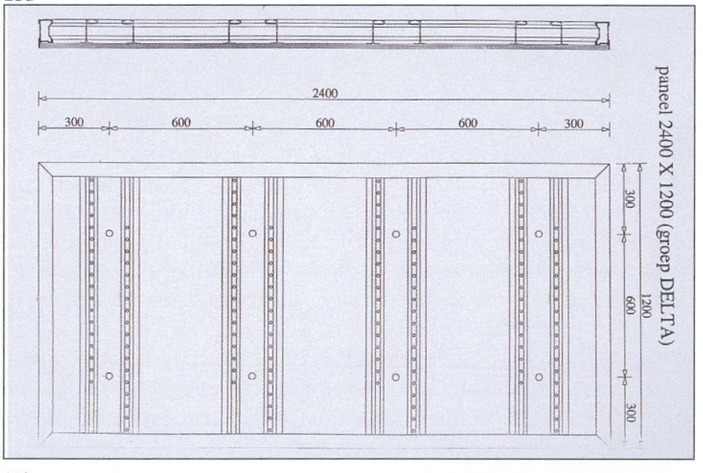
22b



22c



23a



23b

EXIGENCES EN TERMES DE MISE EN ŒUVRE

Mise en place (fig. 24)

L'opération délicate de la mise en place du béton ne peut être réalisée que par des ouvriers ayant des connaissances et une expérience suffisantes. Il est essentiel de disposer d'un plan de déversement soigneusement étudié et de bien convenir avec la centrale de béton des temps de transport et de la continuité des livraisons.

Le premier volume de béton déversé hors du camion-mixer (environ 300 litres) ne possède pas la composition requise et devrait idéalement être rejeté. La hauteur de chute doit être limitée à 1,5m afin d'éviter l'incorporation d'un volume d'air trop important. Le béton est à déverser en couches (30 cm) ou à des intervalles de distance réduits (de 1 à 1,5 m). Pour les murs de grande hauteur surtout, il est conseillé de couler d'abord une couche de 15 cm d'un béton fin et plastique. Celui-ci contient toutes les substances fines et possède le même rapport eau/ciment que le béton qui sera déversé ensuite. D'une part, cette couche sert de 'coussin d'amortissement' de la chute, d'autre part, les particules fines se nicheront sur la surface de contact et contribueront ainsi à l'homogénéité de la surface[13].

Déverser le béton contre le coffrage entraîne une ségrégation. Il est conseillé d'augmenter la hauteur de 5 à 10 cm et d'éliminer cette couche riche en eau après le serrage. Il est exclu de mettre en place par temps pluvieux. Après la mise en place, il faut bien couvrir le haut du coffrage afin d'éviter toute infiltration d'eau de pluie au niveau de la surface de contact.

Serrage

Le serrage par vibration (fig. 25) est une opération délicate qui requiert du savoir-faire et de l'expérience. Une fois dans le béton, l'aiguille doit avoir une fréquence de vibration constante. L'aiguille s'introduit de rapidement, se tient suffisamment longtemps dans le béton et est ensuite retirée lentement. L'intervalle entre deux points de plongée de l'aiguille est choisi en fonction de la portée de serrage (± 10 x le diamètre) en veillant à ce que les intervalles se chevauchent partiellement. Pour que les couches successives se mêlent bien, il est nécessaire d'introduire l'aiguille jusque dans la couche déjà serrée. Les vibrations engendrées dans le coffrage ou dans l'armature lors d'un contact avec l'aiguille, entraînent une ségrégation et des variations de teinte. Cela peut entraîner un marquage de l'armature à la surface du béton.

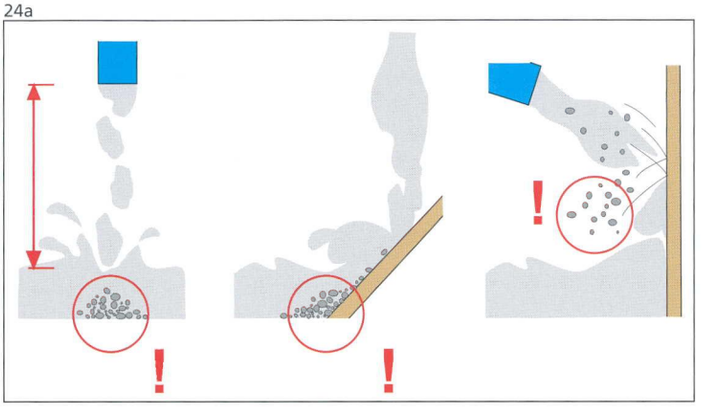
Décoffrage

Souvent, le béton ne reste qu'un seul jour dans le coffrage. En prolongeant cette période, le béton apparent gagne en qualité. Une différence dans la durée de coffrage se répercute en une différence de teinte et doit donc être évitée. Lors du décoffrage, il est exclu d'utiliser un pied-de-biche ou un autre outil touchant le béton. Les éléments décoffrés sont ensuite traités et protégés des coups.

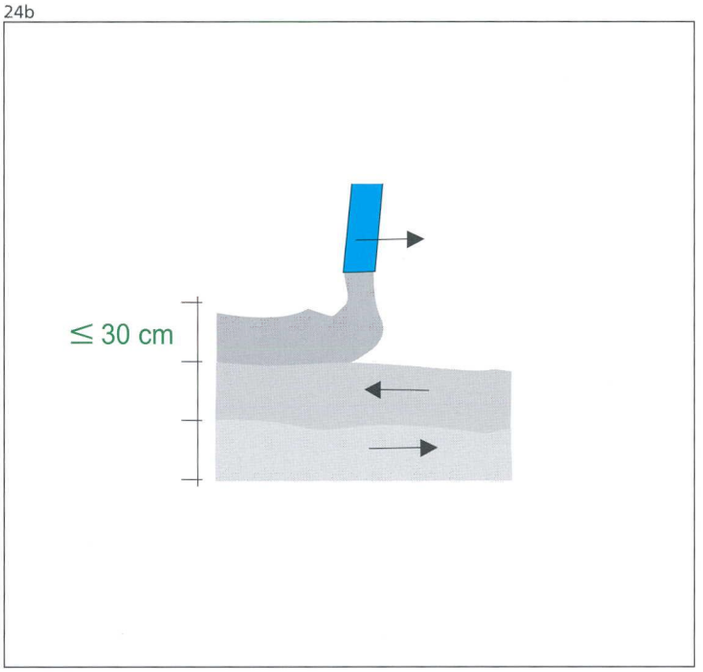
Cure et protection

Après le décoffrage, la surface doit être protégée contre le dessèchement, surtout par temps chaud, venteux ou lorsque le degré d'humidité de l'air est faible (voir tableau à la page suivante). Si on asperge le béton frais d'eau ou qu'on le recouvre d'une bâche, apparaissent des exsudations. Il vaut mieux tendre des bâches ou des toiles mouillées, à faible distance de la surface du béton (fig. 26)[13]. L'ouverture vers le haut doit être fermée convenablement afin d'éviter une circulation d'air (effet de cheminée).

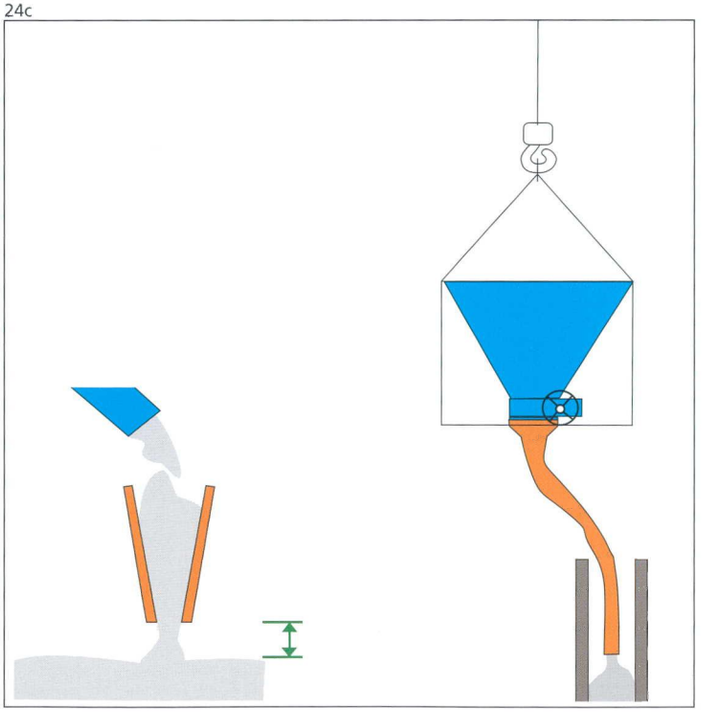
24a



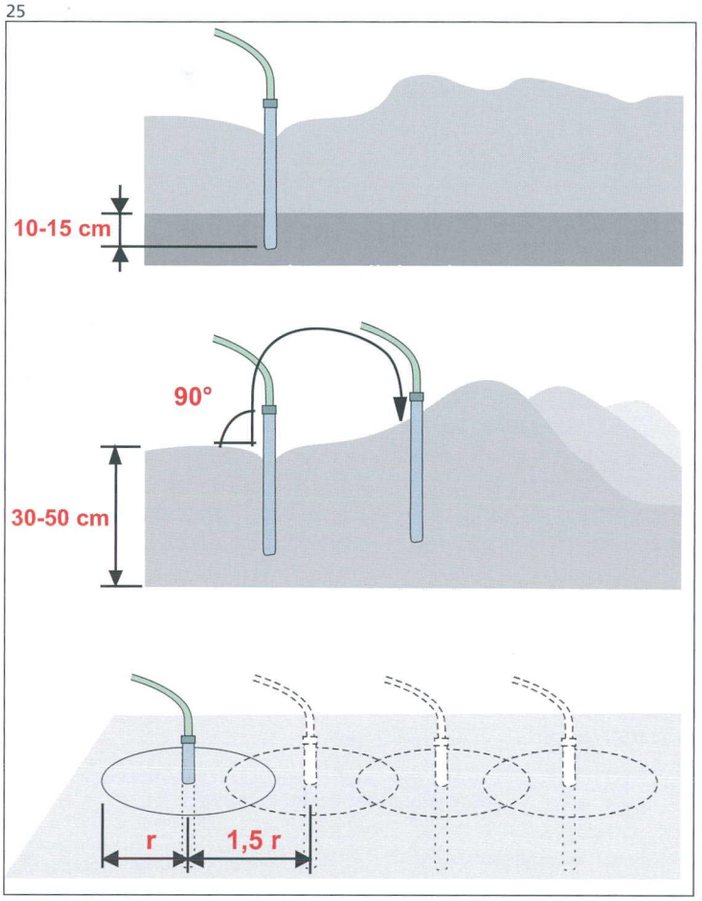
24b



24c



25



26a

26b

26c

24a.
Une hauteur de chute importante et un versage du béton contre une paroi verticale ou oblique entraînent une ségrégation du béton.
24b.
Recommandation : mettre en place le béton par couches successives.
24c.
Recommandation : ralentir la vitesse de versage du béton.

25.
Recommandations relatives à la vibration du béton.

26a, 26b, 26c.
Murs intérieurs en béton apparent. Partie inférieure d'un immeuble, sis à Mons, destiné à abriter un hall multifonctionnel et les archives de l'état, de l'architecte H. Guchez et du bureau d'études Greisch.

Durées minimales de protection du béton frais en jours pour les classes d'exposition 2 et 5a suivant la norme NBN B15-001.(1)

	Développement de la résistance du béton (2)	Rapide			Moyen			Lent		
	Température du béton en cours de cure supérieure à ... °C	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Conditions ambiantes pendant la cure		Durées minimales de cure en jours								
	I - Pas d'exposition directe au soleil et humidité relative de l'air environnant jamais inférieure à 80 %	2	2	1	3	3	2	3	3	2
	II - Exposition à un soleil modéré ou à un vent de vitesse moyenne ou humidité relative jamais inférieure à 50 %	4	3	2	6	4	3	8	5	4
	III - Exposition à un soleil ardent ou à un vent fort ou humidité relative en-dessous de 50 %	5	4	3	8	6	5	10	8	5

(1) Dans le cas des classes d'exposition 3, 3S, 4, 5b et 5c, ces durées minimales de cure doivent être augmentées de 2 jours.
(2) Le développement de la résistance du béton peut être estimé à l'aide du tableau suivant:

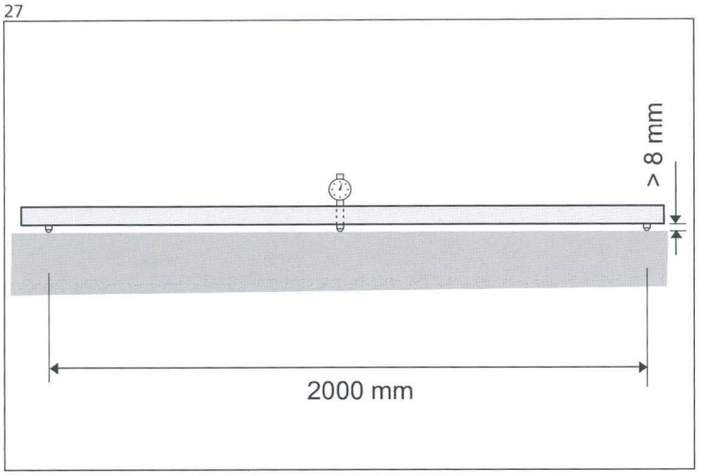
Développement de la résistance du béton	Rapport eau/ciment	Classe de résistance du ciment
Rapide	< 0,5	42,5 – 52,5
Moyen	0,5 – 0,6	42,5
Lent	> 0,6	32,5 – 42,5

PLANS, CAHIER DES CHARGES ET TOLERANCES

Les plans de coffrage et le cahier des charges doivent être exhaustifs. Ils contiendront des données relatives à l'articulation des surfaces: les dimensions des parois de coffrage, l'emplacement, le type et la forme des joints de coffrage et de reprise, le profil des arêtes et bords (aigus, bordés d'une latte d'angle, etc.), la position et le type de tirants à bouts coniques... Le cahier des charges doit mentionner la teinte de gris ou de couleur souhaitée et le type de parois de coffrage afin de déterminer la texture.

Le cahier des charges doit exiger la confection d'un spécimen avant que les travaux ne soient entamés. Après approbation, celui-ci sert d'échantillon de référence. Sa surface est de 1 m² minimum. Un pan de 2 mètres de large sur toute la hauteur d'un étage est à préférer cependant, tant en termes de teinte et de texture que de configuration (joints, trous de tirants, etc.). La comparaison doit se faire depuis une distance minimum à déterminer au préalable et sous des conditions identiques. Le cahier des charges doit cependant stipuler des conditions réalistes. Des exigences du genre 'homogénéité totale', 'parfaite concordance de teinte' ou 'sans exsudations ni pores' sont impossibles à satisfaire et donc inacceptables.

27



La Belgique ne possède aucune norme se rapportant aux exigences de surface pour le béton prêt à l'emploi. Néanmoins, il existe une norme pour le béton architectonique préfabriqué (remplacée récemment par un PTV [15]). Le rapport CIB n° 24 publié en 1975 [16] constitue une base intéressante. La norme française P18-503 'Surfaces et parements de béton. Eléments d'identification' est basée sur ce rapport. Le 'Manuel du coffrage' de Stubeco offre un bon aperçu des directives néerlandaises (voir tableau ci-dessous). Une norme autrichienne [17] définit des classes de béton apparent (*'Sichtbetonklassen'*) stipulant des exigences en matière de couleur, texture et pores de surface (voir tableau à la page suivante). La Beton-Verein allemande renvoie à sa fiche d'informations sur le béton apparent (*Merkblatt 'Sichtbeton'*).

Evaluation de la surface d'un béton selon NEN 6722 (extrait). Les critères d'évaluation suivants sont utilisés:

	Classe d'évaluation de la surface (1)				
	I (surface lisse)			**II (surface rugueuse)**	
Aspects à considérer:	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**
Dessin de la structure du matériau de coffrage accepté	non	non	oui	non	non
Irrégularités et différences locales dues au matériau de coffrage (e.a. dégâts aux plaques, ébarbures et joints de coffrage) en mm	≤ 2	≤ 3	≤ 4	≤ 2	≤ 4
Ecart de planéité des surfaces en mm: – Sous règle longue de 0,4 mm – Sous règle longue de 2 m (2) – Pour des pièces plus grandes, par m (mesurées sous fil) – Avec un maximum sur la surface totale de	 ≤ 2 ≤ 3 ≤ 1,5 10	 ≤ 2 ≤ 5 ≤ 2,5 15	 ≤ 3 ≤ 7 ≤ 3,5 25	 ≤ 2 ≤ 5 ≤ 2,5 15	 ≤ 4 ≤ 7 ≤ 3,5 25
Différences de dimensions aux joints d'angle (e.a. coins de colonnes et de poutres) en mm	≤ 2(3)	≤ 4(4)	≤ 4(4)	≤ 4(4)	≤ 4(4)
Présence de bulles d'air autorisée (5)	oui	oui	–	oui	–

(1) Classe IA: surface lisse sans traitement après décoffrage (exigences sévères)
Classe IB: surface lisse sans traitement après décoffrage (exigences normales)
Classe IC: surface lisse avec traitement après décoffrage
Classe IIA: surface rugueuse sans traitement après décoffrage
Classe IIB: surface rugueuse avec traitement après décoffrage.

(2) La règle de 2 m de long est équipée de pieds réglables et d'un comparateur (voir figure 27).

(3) Exécution telle qu'aucune autre intervention de profilage n'est requise.

(4) Les irrégularités locales du profilage sont retravaillées.

(5) Des surfaces totales de bulles de plus de 1000 mm²/m² sont inacceptables.
Des surfaces totales de bulles de plus de 3000 mm² par 10 m² sont inacceptables.
Retravailler d'éventuels dégâts.

CONCLUSIONS ET QUELQUES RECOMMANDATIONS

Conception, cahier des charges, spécifications du béton, composition, fabrication, transport, coffrage, mise en place... Chaque aspect revêt une importance cruciale dans le processus de réalisation d'un béton voulu apparent et qui répond aux exigences esthétiques et architectoniques. Le succès dépend de l'architecte, de l'ingénieur, de l'entrepreneur et de la centrale de béton. Leur savoir-faire, leur expérience et, surtout, l'établissement de conventions efficaces ainsi que la volonté de travailler ensemble sont la clef de la réussite.

27.
Règle de 2 mètres de longueur (suivant NEN 6722).

28.
Le Balloir à Liège de l'architecte Charles Vandenhove.

28

Evaluation de la surface d'un béton selon la norme ÖNORM B 2211. Celle-ci prévoit les classes suivantes de béton apparent:

Egalité de teinte	***Exigences – caractéristiques***
Classe F1	*Ne sont pas admis: les taches colorées produites par la rouille, le mélange de parois de coffrage de natures différentes, une préparation erronée des parois de coffrage, une cure non professionnelle du béton, des granulats d'origines différentes, des colorations en lignes (spectre de l'armature). Il n'y a pas d'autres exigences en matière d'égalité de teinte.*
Classe F2	*Comme F1, avec l'exigence complémentaire que les colorations dues au mélange de ciment et d'additifs de types et d'origine différents ne sont pas admises. Les différences de teinte produites malgré le respect de ces prescriptions et malgré une mise en œuvre professionnelle sont considérées inévitables et admises.*
Structure	***Exigences***
Classe S1	*Surface de béton lisse, fermée. Les joints doivent être à ce point serrés que la pâte de ciment et/ou particules fines s'infiltrant dans les joints laissent sur la surface des traces de maximum 1 cm de largeur. Des bavures (lignes irrégulières à la hauteur des joints) sont tolérées.*
Classe S2	*Comme S1, mais les joints de coffrage doivent être à ce point fermés qu'il n'y a quasiment pas d'infiltration de pâte de ciment et/ou de particules fines. Les traces de joints se limitent à un trait fin. Les bavures ne sont pas tolérées.*
Classe S1 A	*Comme S1, mais prescription de parois de coffrage spécifiques: par ex. plaques multiplex avec enduit particulier, planches rabotées et serrées, acier, etc.*
Classe S2 A	*Comme S2, mais prescription de parois de coffrage spécifiques: par ex. plaques multiplex avec enduit particulier, planches rabotées et serrées, acier, etc.*
Classe S3	*Surface de béton structurée ou avec mise en forme plastique: par ex. béton lavé, profil spécial au moyen d'une peau de coffrage structurée, etc. Les joints sont plans et fermés. Un lessivage de pâte de ciment et/ou de particules fines n'est pas toléré.*
Pores en surface	***Exigences***
Classe P	*La part de pores ouverts en surface, mesurée sur une surface de mesure de 50 cm x 50 cm au moins, ne peut pas dépasser 0,3 % de cette surface. Les pores d'un diamètre inférieur à 1 mm ne sont pas pris en compte. Le pore le plus grand ne peut pas dépasser 15 mm en diamètre. La mesure se fait sur deux surfaces de mesure par 'lot' (construction ou unité importante d'une construction). Il y lieu de choisir des surfaces de mesure qui sont représentatives de l'impression visuelle globale.*

FEBELCEM

ce bulletin est publié par:
FEBELCEM - Fédération de l'Industrie Cimentière Belge
rue Volta 8
1050 Bruxelles
tél. 02/645 52 11
fax 02/640 06 70
http://www.febelcem.be
e-mail: info@febelcem.be

auteur:
Ir arch. J. Apers

dessins:
Ir arch. N. Naert

lay-out:
arch. D. Nihoul

traduction française:
Marc De Backer

éditeur responsable:
J.P. Jacobs

dépôt légal:
D/2000/0280/05

Bibliographie

1 VAN LEERDAM B.F. ; VERHOEF L.G.W.
Kijk op gevels van beton
Den Bosch : Vereniging Nederlandse Cementindustrie, 1984

2 APERS J.
Gevelvervuiling, een beheersbaar proces
Vademecum voor architecten
Gevels, Studiedag georganiseerd door de Koninklijke Vlaamse Ingenieursvereniging
25 maart 1990

3 *Betonoberfläche - Betonrandzone*
DBV (Deutscher Beton-Verein), Sachstandbericht, November 1996

4 KREIJGER P.C.
Inhomogeneity in concrete and its effect on degradation: a review of technology
Proceedings of the International Conference on Protection of Concrete
University of Dundee, Scotland, UK, 11-13 September 1990

5 LINDER R.
Poren, Lunker und Holzeinschlüsse bei Sichtbeton-, Beschichtungs- und Nutzflächen
Betonwerk + fertigteil-Technik, 5 - 6/1992

6 *Technische aanbevelingen voor het ontwerpen, fabriceren en monteren van elementen in architectonisch beton*
Brussel: FeBe (Federatie van de Betonindustrie), 1993

7 *Memento van architectonisch beton*
Brussel: FeBe, 2de uitgave, 1996

8 APERS J.
Architectonisch beton: duizend-en-een mogelijkheden qua vorm, kleur en textuur
Prefabricage van betonnen gebouwen, Studiedag Technologisch Instituut, Genootschap Civiele Techniek, Antwerpen, 19 maart 1998

9 *Voorschrijven van beton volgens de norm NBN B 15-001. Met voorbeelden van betonspecificaties en type-bestektekst*
Dossier Cement, bulletin 19,
Brussel: FEBELCEM, in samenwerking met FSBP (Federatie van Stortklaar Beton), augustus 1999

10 *Schoon beton*
Den Bosch: VNC (Vereniging Nederlandse Cementindustrie), mei 1990

11 ibid.

12 *Trennmittel für Beton*
DBV (Deutscher Beton-Verein), Merkblatt, März 1997

13 EBELING K.
Planungs- und Ausführungshinweise. Der aufgabenbereich des Betoningenieurs
BETON, 4/1998

14 ibid.

15 *Technische voorschriften (PTV) 21-601:*
Geprefabriceerde elementen van Sierbeton, Probeton, 1999

16 *Tolerances on blemishes of concrete*
CIB (Conseil International du Bâtiment), Report n° 24, 1973

17 *ÖNORM B 2211: Beton und Stahlbetonarbeiten*
Werkvertragsnorm, 07.86

18 *Duurzaamheid en onderhoud van betonconstructies*
CUR rapport nr. 172
Gouda : Stichting CUR, juli 1994

19 *Efflorescences et exsudations*
Dossier Ciment, bulletin 5
Bruxelles: FEBELCEM

Photographies et illustrations

Couverture: Ecole à Paspels (Suisse), architecte Valerio Olgiati: © Atelier Kinold

2, 23b: © Christian Richters Fotograf

8a, 8b: © Atelier Kim Zwarts

9a, 9b, 9c: documents Noeplast

11, 12a, 12b, 14, 15b, 22b, 22c: documents Febelcem

16a, 16b: © Serge Brison photographe

17, 18a, 18c, 28: © Atelier Kinold

21a, 23a: documents Cometal

26a, 26b, 26c: © A. Nullens