

FAÇADES ET PAREMENTS EN ÉLÉMENTS ARCHITECTURAUX PRÉFABRIQUÉS

Patrick ROUGEAU

Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB)

Isabelle LALLEMANT

SIKA

*« Qu'il loge ou qu'il mange, l'homme rêve aussi, et regarde...
Il peut être aidé et stimulé par la charge émotionnelle et
la beauté de l'espace, de son logement et de sa ville. »*

Ricardo Porro

INTRODUCTION

Les caractéristiques esthétiques des parements en béton sont fondamentales pour de nombreuses applications, qu'il s'agisse de bâtiments ou d'ouvrages de génie civil.

Le béton architectonique préfabriqué est un matériau complet qui offre à l'architecte une vaste gamme de possibilités techniques pour traduire sa vision des bâtiments et des ouvrages. Il offre au concepteur une large palette de couleurs et de textures, du fait de ses constituants multiples et soigneusement choisis. A la fois élément de structure et élément plastique, il traduit en volumes simples ou complexes la pensée de l'architecte. Les méthodes de fabrication actuelles permettent de garantir la qualité attendue de l'ouvrage, en terme de performances et de finitions.

La première partie de cette communication a pour objectif de présenter succinctement les principaux mécanismes optiques des interactions entre la lumière et le béton. La deuxième partie porte sur les éléments architecturaux réalisés en usine de préfabrication.

1. QUELQUES RAPPELS SUR LES INTERACTIONS LUMIERE-BÉTON

1.1. Les principaux mécanismes optiques à la surface des bétons

Les phénomènes optiques qui déterminent les caractéristiques des surfaces en béton sont complexes car le béton est un matériau poreux constitué d'un assemblage de minéraux de nature et de dimension très variées en interaction avec le milieu environnant et notamment avec l'humidité de l'air ambiant. Les éléments présentés ci-dessous, issus de la synthèse bibliographique réalisée par Lallemand (2001), montrent le rôle déterminant des constituants et de la porosité du béton.

Pour les bétons gris, le paramètre essentiel est celui correspondant à la luminosité. Les systèmes colorimétriques fixés par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) sont notamment le système $Y x y$ et le système $L^* a^* b^*$ (figure 1). Dans les systèmes colorimétriques usuels $Y x y$ et $L^* a^* b^*$, la luminosité correspond respectivement à la réflectance Y et à la luminance L^* . La teinte et la saturation n'interviennent pas. Les surfaces de béton présentant par exemple des hétérogénéités de teinte sont caractérisées par des variations de la luminance. Les zones claires possèdent une luminance plus élevée que les zones sombres. On devrait parler en fait d'hétérogénéités de luminosité et non pas d'hétérogénéités de teinte. Pour les bétons colorés, les paramètres importants sont ceux liés à la chromaticité c'est-à-dire x et y pour le système $Y x y$, et a^* et b^* pour le système $L^* a^* b^*$.

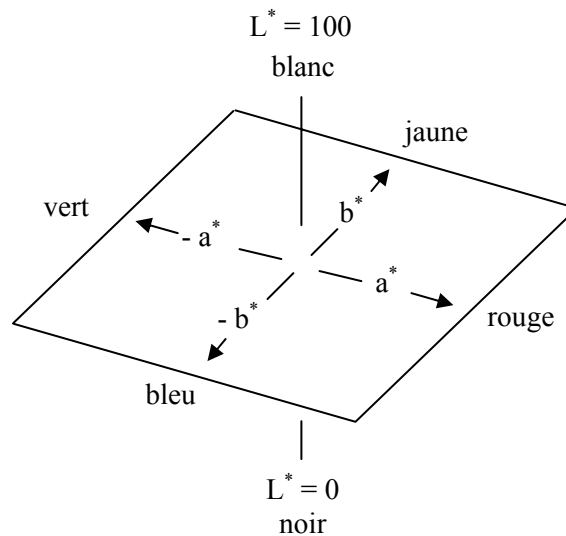


Figure 1 : Schéma du système CIELAB

A l'échelle microscopique, le béton est un milieu hétérogène, composé de granulats, de composés anhydres et hydratés distincts, de pores de tailles différentes saturés ou non d'eau,... Il ne possède pas de ce fait un indice de réfraction unique. Le matériau peut être considéré comme une multitude de milieux homogènes de petites dimensions possédant chacun un ou des indices de réfraction propres. Les indices de réfraction dans le domaine du visible de composés susceptibles d'être présents dans les matrices cimentaires sont listés ci-dessous (McCrone, 1973 ; St John, 1998 ; Campbell, 1999 ; Hornain, 2001) :

- C_3S : 1,714 à 1,717
- $\beta-C_2S$: 1,707 à 1,73
- C_3A : 1,71
- C_4AF : 1,96 à 2,04
- $Ca(OH)_2$: 1,54 à 1,58
- C-S-H (I) : 1,494 à 1,530
- C-S-H (II) : 1,5
- Tobermorite 11 Å : 1,545 à 1,565
- SiO_2 quartz : 1,551 à 1,544
- calcite : 1,486 et 1,658

Dans le cas où le matériau est constitué de plusieurs minéraux, une approximation consiste à calculer un indice de réfraction moyen à partir des fractions pondérales des différents constituants (Cyr, 1999). Ainsi, un ciment Portland CEM I possède un indice de réfraction moyen compris généralement entre 1,70 et 1,73.

La réfraction au sein du béton est liée entre autres à la présence des pores et à leur taux de saturation. La déviation d'un faisceau lumineux est moindre dans un béton complètement saturé d'eau comparativement à un béton partiellement désaturé. En effet, la différence d'indice de réfraction entre le béton et l'eau est plus faible que la différence d'indice entre le béton et l'air ; l'indice de l'eau est égal à 1,33 alors que celui de l'air est égal à 1.

Selon Desvignes (1992), les céramiques, les matériaux de construction, les textiles et les papiers sont considérés comme des milieux diffusants. Le béton peut également être assimilé à un milieu diffusant. Un milieu diffusant est caractérisé d'une part par son coefficient de diffusion et d'autre part par son coefficient d'absorption (Wolf, 1968). Pour des parements en béton brut de démoulage, la réflexion diffuse est majoritaire par rapport à la réflexion spéculaire¹. Compte tenu de l'épaisseur des parements en béton, la transmission est nulle. Les théories sur les milieux diffusants permettant de déterminer ces deux coefficients sont notamment la théorie de Kubelka et Munk (Kubelka, 1948 ; Wyszecski et al., 1967 ; Kowalski, 1990) et la

¹ Dans le cas de la réflexion spéculaire, la lumière est réfléchiée dans une seule direction au niveau de l'interface de deux milieux homogènes caractérisés par des indices de réfraction différents. Dans le cas de la réflexion diffuse, la lumière est réfléchiée dans toutes les directions. La réflexion diffuse, contrairement à la réflexion spéculaire, n'est pas un phénomène de surface ; elle se produit dans l'épaisseur du matériau.

théorie de Silvy (Silvy, 1980 ; Kowalski, 1990). La détermination des valeurs des coefficients de diffusion et d'absorption d'un échantillon de béton nécessite l'évaluation de plusieurs grandeurs : l'épaisseur de l'échantillon de béton aminci, la réflectance de deux fonds réflecteurs², la réflectance de l'échantillon de béton aminci disposé sur chaque fond réflecteur (Lallemant, 2001). Il est également nécessaire d'évaluer numériquement la réflectance du béton appelée encore réflectance infinie.

1.2. Facteurs influençant la teinte des bétons.

L'analyse des caractéristiques optiques des milieux diffusants comme le béton montre que la teinte de surface du matériau résulte des phénomènes d'absorption et de diffusion, et donc de la réflexion et de la réfraction. Ces différents phénomènes dépendent des caractéristiques structurales de la surface du béton. Celles-ci sont le résultat d'une combinaison de différents facteurs tels que la composition du béton (caractéristiques des constituants du béton, rapport E/C), les caractéristiques de la surface du moule, les produits de démoulage, les conditions de mise en place et de serrage, l'effet de paroi, la cure, les conditions d'exposition. Ces facteurs déterminent les caractéristiques des assemblages minéralogiques (nature des minéraux, texture et taille) de la matrice cimentaire de la peau du béton.

1.2.1. Composition du béton

La teinte d'un béton est liée à celle des constituants qui le composent. Dans le cas des bétons bruts de démoulage, elle dépend de la teinte des constituants les plus fins (ciment, fine du sable et, le cas échéant, des additions minérales, des pigments). En effet, en raison des effets de paroi, la peau du béton qui constitue la partie visible à l'œil nu est composée des grains les plus fins. Plus les éléments utilisés sont fins, plus leur influence sur la teinte du béton est forte. Les dosages en constituants, particulièrement ceux les plus fins, doivent donc être précis afin d'obtenir une teinte régulière d'un élément à un autre (Darcemont, 1982 ; Bresson, 1995).

Les ciments CEM I ont une teinte blanche ou grise. Ces deux types de ciment se distinguent l'un de l'autre notamment par la teneur en oxydes métalliques principalement le fer. La réflectance du ciment blanc est supérieure à celle du ciment gris. Un ciment blanc est un ciment qui diffuse dans toutes les directions toutes les radiations visibles qu'il reçoit. Les ciments gris diffusent ou transmettent partiellement les diverses radiations visibles qu'ils reçoivent.

En raison de leur finesse, les additions minérales fines ou ultrafines ont une forte influence sur la teinte des bétons. Les bétons à hautes performances réalisés couramment avec de la fumée de silice grise ont une teinte généralement plutôt sombre. L'utilisation d'ultrafines telles que les fumées de silice blanche, les métakaolins, les microfillers calcaire ou siliceux permettent d'obtenir des parements clairs.

Les pigments sont des matériaux opaques colorés. Ils renvoient par réflexion diffuse une partie du rayonnement lumineux incident après en avoir absorbé une autre partie de façon sélective. Les pigments ajoutés au béton ont une influence prépondérante sur la teinte de celui-ci car leur dimension moyenne est inférieure au micron. Pour obtenir un béton de teinte tendant vers le blanc c'est-à-dire un béton qui diffuse beaucoup, il est possible d'utiliser par exemple un pigment d'oxyde de titane (TiO_2) car celui-ci possède un fort pouvoir diffusant, l'indice n du TiO_2 étant égal à 4.

La teinte naturelle grise de la pâte de ciment dépend fortement du rapport E/C. La réflectance est généralement plus élevée pour les bétons à fort E/C.

1.2.2. Nature du moule et produit de démoulage

La peau du béton dépend étroitement de la surface du moule. Les moules peuvent être absorbants (bois brut) ou non absorbants (métal, bois baké, élastomère, etc.). Les moules absorbants ont une grande facilité d'absorption de l'eau excédentaire du béton frais et évitent en général la formation de bulles d'air à la surface du béton (Linder, 1975). La capacité d'absorption d'un moule absorbant dépend du nombre de réemplois ; en effet, à chaque utilisation, l'imperméabilité du bois augmente ce qui peut avoir comme conséquence une modification de la teinte du béton. Par ailleurs, selon Linder (1975), l'eau en contact avec le moule non absorbant n'étant pas absorbée par celui-ci, a tendance à véhiculer les fines du béton et notamment celles du ciment sous l'effet de la vibration. Ces fines particules se placent préférentiellement contre la paroi du moule. Elles sont entre autres responsables de la teinte des faces moulées.

² Les fonds réflecteurs dont la luminance est connue constituent des repères.

Il faut distinguer d'une part les démoulants à action physique, et d'autre part ceux à action physico-chimique. Les démoulants à action physique, par exemple les huiles minérales, n'exercent pour ainsi dire aucune influence sur le durcissement du béton. Les agents de démoulage à action chimique peuvent ne pas convenir lorsqu'un traitement thermique est appliqué car ils se transforment et peuvent entraîner une décoloration du béton (Linder, 1975).

Par ailleurs, les produits de démoulage ne peuvent pas compenser les différences de teinte de la surface du béton qui sont dues à l'utilisation simultanée de moules en bois neufs et usagés dont le pouvoir d'absorption diffère. En effet, plus un moule est rugueux et absorbant, plus la quantité de démoulant nécessaire augmente. Suivant le mode et l'intensité du serrage du béton frais, et suivant la nature et la quantité d'agent de démoulage utilisé, le film de produit de démoulage imprègne la surface du béton à des profondeurs variables ce qui peut entraîner des différences de teinte (Hermann, 1993). Une zone de béton recouverte d'un excès de produit de démoulage n'a pas le même comportement vis-à-vis de la lumière qu'un béton recouvert uniquement d'un film très mince. Cela se traduit par une réflectance différente pour les deux types de zones et donc par un contraste de teinte, ou plutôt de luminosité, au niveau du parement en béton.

1.2.3. Influence de la mise en place et des effets de paroi

Au cours de la vibration, tous les grains du béton sont soumis à des amplitudes et des accélérations qui entraînent leurs déplacements les uns par rapport aux autres, ce qui provoque un tassement et permet le serrage du béton (Geoffray, 1991 ; Bresson, 1995). Selon Bresson (1995), la vibration doit induire un minimum de mouvements d'eau, ces derniers étant responsables des légères variations locales du rapport E/C et par conséquent de la teinte.

La présence de la surface du moule engendre un effet de paroi. Cet effet de paroi combiné à la vibration est à l'origine de la teneur élevée en éléments fins dans la couche superficielle du béton. Les zones du béton les plus proches de la paroi du moule sont donc plus riches en particules fines que celles au cœur et au niveau de la face arasée. Ceci est dû au fait que le centre des plus gros granulats ne peut s'approcher plus près de la paroi du moule que de leurs rayons moyens ce qui génère des espaces entre les gravillons. Ces espaces sont alors remplis par les éléments les plus fins. En raison de l'effet de paroi, certaines propriétés de la peau du béton diffèrent de celles de l'intérieur du béton (Kreijger, 1984). Cela a des conséquences sur les propriétés de transfert du matériau avec le milieu ambiant et sur sa durabilité. Selon Miragliotta (2000), la porosité correspondant à la face en fond de moule est plus faible que celle relative à la face arasée.

1.2.4. Influence des caractéristiques du béton durci

Les phases principales³ C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF du clinker en présence de gypse provoquent au contact de l'eau des réactions exothermiques d'hydratation, et forment essentiellement des silicates de calcium hydratés (C-S-H), de la portlandite, de l'ettringite, du monosulfate d'alumine de calcium et éventuellement des aluminates de calcium hydratés. La quantité de toutes les phases citées précédemment augmente avec le degré d'hydratation.

L'application d'un traitement thermique éventuel et la cure du béton aux jeunes âges influent d'une part sur le processus d'hydratation et d'autre part sur les phénomènes de transfert du béton avec le milieu ambiant. La teinte du béton varie en fonction du degré de durcissement (Bresson, 1995). Il a été observé que le traitement thermique d'éprouvettes en béton tend à éclaircir leur teinte. La solution interstitielle comportant de la chaux migre du cœur vers la surface du matériau. L'eau présente dans les pores en surface du matériau tend à s'évaporer. La calcite peut se former en surface. Ces phénomènes combinés sont à l'origine de l'éclaircissement de la teinte du béton (Lallemant, 2001).

La diffusion de la lumière dépend de la nature mais également de la taille des composés (figure 2). Plus les assemblages minéralogiques sont de petite taille, plus la lumière est déviée de façon répétée et donc plus le libre parcours moyen des photons sans être diffusés est petit. La probabilité de diffusion définie comme l'inverse du libre parcours moyen est d'autant plus grande que les assemblages sont de petite taille. Le parement en béton est d'autant plus clair que la diffusion est forte (réflectance élevée).

³ C_3S : $3CaO.SiO_2$; C_2S : $2CaO.SiO_2$; C_3A : $3CaO.Al_2O_3$; C_4AF : $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$

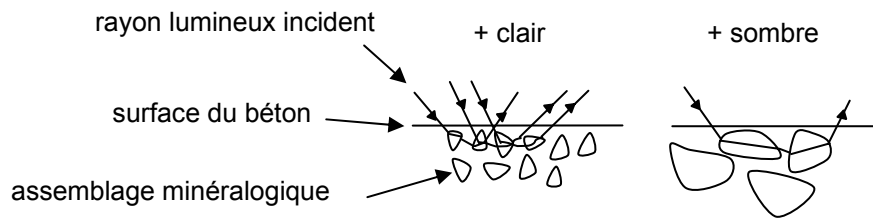


Figure 2 : Représentation schématique du trajet de la lumière au sein d'un béton caractérisé par des assemblages minéralogiques de même nature mais de taille différente

Au cours de l'hydratation, la transformation des phases anhydres en phases hydratées s'accompagne d'une réduction du volume des pores capillaires. L'évolution de la porosité et des assemblages minéralogiques a une incidence sur la teinte des parements. Plus le nombre de pores est élevé dans la matrice cimentaire située en surface, plus la réfraction du faisceau lumineux est multipliée (figure 3). Cela conduit à un éclaircissement de la surface du béton.

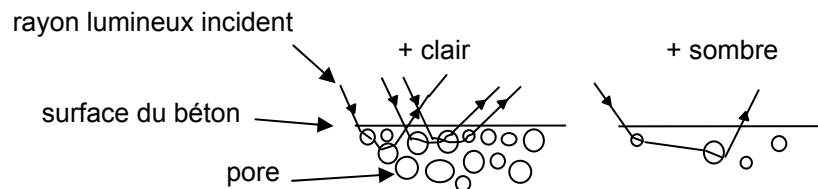


Figure 3 : Représentation schématique du trajet de la lumière au sein d'un béton caractérisé par une concentration de pores différente

1.2.5. Influence des conditions d'exposition des parements

La teinte du béton dépend de la nature et de la taille des assemblages minéralogiques, de la porosité, du degré de saturation des pores et donc des conditions hygrométriques du milieu environnant (Lallement, 2001).

Dans le cas d'un béton complètement saturé en eau ou inversement complètement désaturé et constitué d'assemblages minéralogiques d'indice de réfraction n très différent, de taille comparable et de même porosité, la diffusion sera plus importante dans les zones de béton possédant des assemblages minéralogiques caractérisés par le plus fort indice de réfraction. En effet, la déviation de la lumière est d'autant plus forte que la différence d'indice de réfraction entre deux milieux contigus (soit air/assemblages minéralogiques, soit eau/assemblages minéralogiques) est élevée. Ainsi, un béton possédant des assemblages minéralogiques d'indice de réfraction élevé aura une réflectance plus forte qu'un béton constitué d'assemblages minéralogiques de plus faible indice de réfraction.

Lorsque le béton est en contact avec une atmosphère dont l'humidité relative est faible, l'eau contenue dans les pores à proximité de la surface du béton s'évapore. Inversement, des pores situés en surface du béton initialement désaturés vont se resaturer au contact d'une ambiance hygrométrique plus forte que l'humidité relative d'équilibre avec le taux de saturation initial du béton. Le béton désaturé possède une réflectance plus élevée. De ce fait, la luminosité du matériau désaturé est plus forte que celle du matériau saturé. La différence d'indice du système air/béton étant plus élevée que celle du système eau/béton, la diffusion du béton saturé en eau est plus faible que celle du béton asséché. La réflectance d'un matériau poreux comme le béton dépend de la taille, de la concentration, du taux de saturation des pores et donc de l'humidité relative.

1.2.6. Des mécanismes optiques aux applications industrielles

Associés à des analyses et des essais expérimentaux, les éléments présentés précédemment ont permis de préciser les causes pouvant être à l'origine de la formation des hétérogénéités de teinte sur des parements en béton gris brut de démoulage (Lallement, 2001). Une étude a été réalisée afin d'identifier des moyens d'action pour éviter la formation de ces défauts. L'approche méthodologique a consisté d'une part à caractériser les hétérogénéités de teinte de bétons prélevés sur des sites industriels et d'autre part à identifier, à partir d'essais en laboratoire et en usine, les paramètres de premier ordre vis-à-vis des hétérogénéités de teinte.

Les résultats expérimentaux ont permis d'établir un lien entre les interactions béton – lumière et les caractéristiques microstructurales des zones claires et des zones sombres. Les hétérogénéités de teinte étudiées dans le cadre des travaux de Lallemand (2001) sont essentiellement dues à des hétérogénéités de la compacité du béton de peau. Les caractérisations de la microstructure des zones claires et des zones sombres ont permis de déterminer la nature de leurs assemblages minéralogiques. Les deux types de zones sont constitués essentiellement de calcite et d'hydrates du type C-S-H en proportion différente. La calcite est le composé principal des zones claires et les C-S-H constituent les composés majoritaires des zones sombres. La distribution de la taille des pores des zones claires est différente de celle des zones sombres : les zones sombres sont formées de pores de plus petite taille que les zones claires. Ces différences de compacité confèrent aux zones sombres et aux zones claires des propriétés différentes vis-à-vis des transferts de matière : les zones sombres sont moins perméables que les zones claires. Les zones sombres possèdent une plus forte aptitude à la rétention d'eau que les zones claires. L'humidité relative de l'air est susceptible de modifier le contraste de teinte des bétons après démoulage. À 65 % d'humidité relative, les zones sombres tendent à s'éclaircir. Lorsque l'humidité relative est élevée (au delà de 95 %), l'évolution de la teinte des zones sombres est beaucoup plus lente.

L'épaisseur de béton concernée par les interactions avec la lumière est de l'ordre de la centaine de micromètres. Dans cette épaisseur, la peau du béton est constituée du ciment et des fines du sable. La perception des zones claires et des zones sombres résulte du fait que la diffusion se fait différemment dans les deux types de zones. La diffusion dépend de la microstructure du matériau et est plus forte dans les zones claires (présence en plus grande quantité de microcristaux de calcite, pores de plus petite dimension).

Les caractéristiques des constituants du béton susceptibles d'influencer la compacité telles que la granulométrie des granulats, la distribution de la taille des grains de ciment, la finesse du ciment, la nature des adjuvants doivent être régulières et homogènes pour la fabrication d'un même élément. Les moyens d'action qui se sont révélés être pertinents pour réduire les écarts de compacité à rapport E/C constant sont une optimisation de l'adjuvantation, du malaxage, de la vibration et des conditions de conservation des éléments préfabriqués immédiatement après démoulage. L'addition de superplastifiant en quantité suffisante à des bétons non adjuvantés ou adjuvantés insuffisamment tend à homogénéiser la répartition du liant et conduit à l'obtention d'une teinte plus homogène. Il est nécessaire que le malaxage soit le plus efficace possible de manière à obtenir un mélange homogène. L'application d'une vibration homogène sur l'ensemble des faces du moule et d'une vibration adaptée au type de béton fabriqué permet d'atténuer les variations locales de la compacité. Les observations réalisées en laboratoire ont montré que l'utilisation d'un moule absorbant tend à améliorer l'homogénéité de la teinte. Un autre principe déjà expérimenté dans certaines usines consiste à soumettre les éléments à un air chaud pulsé juste après démoulage pendant une durée courte.

2. LES ÉLÉMENTS ARCHITECTURAUX PRÉFABRIQUÉS

2.1. Le béton architectonique

Les principaux éléments architecturaux préfabriqués en usine sont les panneaux de façades, les escaliers, les corniches, les garde-corps, les coques, les murs anti-bruit, le mobilier urbain,...

On distingue deux grandes familles de produits :

- les éléments porteurs, utilisés pour la réalisation totale ou partielle de la structure de l'édifice ; ils sont obligatoirement montés à l'avancement du chantier avec une contrainte de respect du planning de livraison ;
- les éléments non porteurs ou autoporteurs ; ils sont utilisés pour réaliser la finition architecturale de l'édifice et sont en général montés en fin de chantier ; cette approche constructive permet de gérer le chantier de manière séquentielle, offrant une plus grande souplesse de réalisation ; ces éléments sont également utilisés pour la réalisation de peaux coffrantes économiquement intéressantes pour mettre en oeuvre le béton de structure et intégrer directement le parement souhaité.

La « pâte » du béton moulable à froid autorise des formes les plus variées : plans droits, courbes, reliefs, colonnes, frontons, corniches, incrustations,... La forme est obtenue par les moules, les outillages et les matrices utilisées en usine. Plusieurs matériaux sont utilisables pour mouler le béton : l'acier, le bois, le polyester, les matrices en élastomère.

Les matrices en élastomère sont utilisées pour la réalisation de reliefs et de formes complexes, impossibles à réaliser avec les moules ou coffrages traditionnels. La peau du moule est réalisée à partir d'un matériau élastomère polymérisable coulé sur un modèle servant de contre-moule (reproduction d'un motif existant la plupart du temps). Certaines peaux de coffrage sont également proposées sur catalogue par des fournisseurs spécialisés. La peau de coffrage ainsi réalisée est ensuite fixée à un support rigide ce qui permet d'effectuer le coulage du béton et de reprendre la poussée du béton frais.

Parement avec modénatures ➤



La teinte est quant à elle fonction des caractéristiques des constituants du béton. Pour les parements bruts de démoulage, elle dépend principalement des éléments les plus fins et du ciment choisi. La plupart des compositions de béton des éléments architecturaux sont à base de ciment blanc. Celui-ci autorise une diversité de teintes claires.

La texture constitue le troisième élément sur lequel il est possible d'agir pour diversifier l'aspect. Elle résulte des techniques de traitements de surface sur les bétons frais ou durcis. Le parement brut porte l'empreinte du moule.

◀ *Le béton bleu froissé de la patinoire de Montpellier, Chaix et Morel*

En faisant varier ces trois paramètres, l'architecte dispose d'une gamme pratiquement infinie d'aspects pour réaliser des ouvrages de bâtiment ou de génie civil à partir d'éléments architecturaux fabriqués en usine.

2.2. Les différents traitements de surface utilisés en usine

Différents traitements chimiques, physiques ou mécaniques sont utilisés pour modeler les caractéristiques optiques des surfaces des éléments architecturaux. Les principales techniques de traitements de surface correspondent au lavage au jet d'eau, acidage, sablage, bouchardage, grésage, polissage, grattage, brossage (tableau 1).

Exemple de parement sablé ➤



Type de traitement	Principe du traitement et description de l'aspect
Brossé, strié	Brossage ou décapage faisant apparaître partiellement les granulats.
Lavé	Lavage au jet d'eau faisant apparaître partiellement les granulats
Désactivé	Application d'un désactivant sur la paroi du moule avant coulage. La surface est ensuite décapée au jet d'eau ou brossée pour faire apparaître les granulats.
Acidé	Attaque plus ou moins profonde de la surface à l'acide, puis rinçage à l'eau pour faire apparaître les grains fins ou les gros granulats.
Gommé	Sablage extrêmement fin de la surface pour procéder à une homogénéisation de l'aspect ou à un nettoyage.
Sablé	Surface attaquée à l'aide d'un jet de sable faisant apparaître plus ou moins les granulats.
Bouchardé	Attaque de la surface à l'aide d'une boucharde faisant éclater la surface du béton pour offrir un aspect rugueux plus ou moins prononcé. Ce traitement fait ressortir la structure interne des gros granulats.
Poncé	Parement attaqué superficiellement à la meule abrasive, dégageant partiellement les sables.
Grésé	Parement attaqué en profondeur à la meule abrasive pour faire ressortir la texture du béton. La surface est rugueuse et conserve les traces de l'outil.
Poli (mat ou brillant)	Obtention par polissage d'une surface unie, sans rayure apparente. Selon les granulats employés et le traitement final, la surface peut être mate ou brillante, exempte ou non de bullage.
Flammé ou brûlé	La surface est éclatée par l'action de la chaleur d'une flamme sur quelques millimètres pour faire ressortir les granulats.
Eclaté	Parement cassé par fendage faisant apparaître l'ensemble des constituants avec cassure des gros granulats.

Tableau 1 : Principaux traitements de surface utilisés

2.3. Assemblage des éléments

Les assemblages, également appelés liaisons, sont employés pour réaliser le liaisonnement mécanique des éléments entre eux et avec la structure. L'organisation générale des liaisons et leur choix doivent faire l'objet d'une étude prenant en compte les différentes phases de réalisation et d'utilisation de l'édifice. De nombreux systèmes de liaisons sont utilisables : liaisons bétonnées avec aciers en attente, liaisons ponctuelles boulonnées, soudées, brochées, etc. Ces liaisons sont complétées par des systèmes de joints d'étanchéité (joints préformés ou mastics) assurant l'étanchéité à l'eau et à l'air (figure 4).

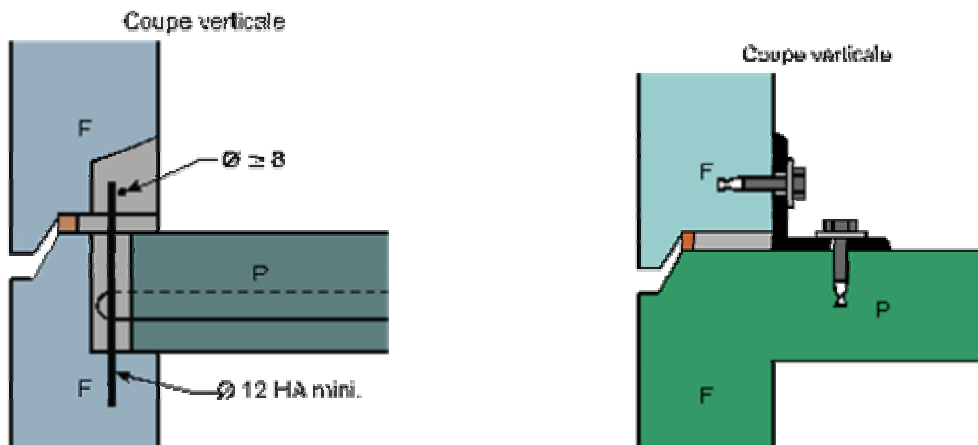


Figure 4 : Exemples de liaisons

2.4. La certification QualiF-IB « Éléments architecturaux »

Construire certaines parties de l'ouvrage en amont dans l'usine présente plusieurs avantages, parmi lesquels :

- une qualité de production industrielle permettant une maîtrise de la continuité des aspects ;
- des délais de production connus ;
- des produits finis, visibles avant la mise en œuvre ;
- l'économie qui résulte de la production en série ;
- la certification de qualité de produits QualiF-IB.

Délivré par l'organisme certificateur FIB, le QualiF-IB atteste la conformité des éléments aux exigences définies dans le cahier des charges « Éléments architecturaux en béton fabriqués en usine ». Le cahier des charges s'applique aux éléments architecturaux en béton destinés au bâtiment et au génie civil. Il définit une terminologie d'état de surface et fixe des prescriptions communes, les moyens de mesures et d'essais pour les vérifier, ainsi que le marquage pour les identifier. Le cahier des charges propose également une méthodologie pour l'acceptation des parements ainsi qu'une grille pour la définition des exigences applicables aux éléments architecturaux.

Les caractéristiques objet de la certification QualiF-IB sont notamment :

- l'aspect : homogénéité de la teinte, texture ;
- les caractéristiques géométriques : dimensions, position des armatures, inserts, ... ;
- la durabilité : enrobage des armatures, absorption d'eau, résistance à la compression du béton, gel/dégel ;
- le respect d'un délai minimal de livraison de 7 jours après traitement.

Le cahier des charges FIB « Éléments architecturaux fabriqués en usine » stipule que l'aspect de surface est caractérisé par :

- la désignation d'une référence, à savoir un élément témoin, préalablement soumis à l'acceptation du donneur d'ordre ; de plus, pour les surfaces destinées à rester vues après achèvement de l'ouvrage, la désignation est complétée par l'identification, sur un nuancier de référence, du niveau de teinte moyenne correspondant à l'échantillon témoin ; le niveau de teinte moyenne constitue la référence pour apprécier ultérieurement la conformité du niveau de qualité (homogénéité) de la teinte des éléments ;
- la définition du niveau de qualité attendu ; celui-ci est spécifié par deux critères désignés chacun par une lettre majuscule (T pour la teinte et E pour la texture d'épiderme) ; pour chacun d'eux, la lettre est suivie d'un chiffre variable de 0 à 4 qui correspond à des niveaux croissants d'exigence repris du fascicule de documentation AFNOR P18-503 de novembre 1989.

2.5. L'apport des nouveaux bétons : BAP et BFUP

Les Bétons Auto-Plaçants et les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances apportent de nouvelles possibilités pour réaliser des structures plus complexes, plus légères et plus élancées.

En raison de leurs propriétés rhéologiques spécifiques, les BAP constitue une réelle avancée technologique. Grâce à leur fluidité et à leur résistance à la ségrégation, ils peuvent remplir des zones confinées sans application de vibration. Les BAP s'avèrent être des matériaux très prometteurs pour l'industrie du béton et complémentaires des bétons traditionnels. Ils permettent d'obtenir des parements très esthétiques dès lors que toutes les précautions sont prises à cet effet. La composition des BAP doit être adaptée aux applications visées. Il n'existe pas de formulation type. La gamme de résistances mécaniques du BAP est très étendue, de 25 à 100 MPa voire davantage. Les principaux paramètres à optimiser sont la nature des additions, le volume de pâte, la taille des plus gros gravillons par rapport à l'espacement des armatures, la nature et le dosage du superplastifiant et de l'agent de viscosité. Ce dernier n'est pas indispensable mais il présente des avantages. Il permet de mieux contrôler la résistance à la ségrégation du matériau et de réduire la sensibilité des formulations aux fluctuations du dosage en eau et des caractéristiques des constituants. Les écarts admissibles sur le dosage en eau sont en général de l'ordre de ± 5 à 8 l/m^3 , ce qui rend les formules BAP pointues. Une attention particulière doit également être portée au couple béton/huiles (ou cires) de démoulage afin de diminuer les risques de bullage.

L'ensemble des concepts à la base des BFUP confère à ces matériaux un caractère de très haute technicité qui contraste avec l'image traditionnelle du béton si souvent véhiculée. Pour autant, les BFUP s'avèrent réalisables avec des moyens classiques. Les BFUP renforcés de fibres constituent pour l'industrie une innovation certaine. Ces matériaux à très haute résistance à la compression et à la traction par flexion offrent d'intéressantes opportunités pour la préfabrication puisque les produits peuvent être fabriqués sans armature passive. Il devient possible d'envisager des sections plus fines et une plus grande variété de formes.

Les propriétés mécaniques des BFUP sont très élevées :

- résistance à la compression de 150 à 200 MPa pour les BFUP réalisés sans pressage et avec un traitement thermique ne dépassant pas 100°C , jusqu'à 800 MPa pour les BFUP réalisés avec un pressage et traités à des températures plus élevées ;
- résistance à la flexion de 30 à 50 MPa en fonction de la nature et de la quantité de fibres.

Les BFUP ont un aspect semblable à celui des céramiques. Les pièces fabriquées peuvent être de différentes couleurs grâce à l'utilisation de pigments. Les surfaces moulées sur des parois de plastique sont similaires à des surfaces polies et réfléchissent la lumière. L'utilisation d'un moule en élastomère permet d'obtenir des surfaces mates. Les BFUP sont des matériaux faciles à mouler et bien adaptés à la préfabrication. On peut les utiliser pour produire des formes de complexité variée et obtenir une excellente reproduction des détails. Ces matériaux ont été utilisés pour réaliser des éléments architecturaux de différente nature : des panneaux de façade, des coques (péage de Millau), des éléments décoratifs (pavillon d'Arsenal), des escaliers, des sculptures (arbre Martel), des panneaux acoustiques (gare de Monaco),...

2.6. Intérêt des oxydes de titane pour la réalisation de bétons auto-nettoyants et dépollueurs

Les recherches récentes concernant le nettoyage des surfaces des matériaux de construction basé sur la photo-catalyse ont mis en évidence l'intérêt de ce nouveau procédé pour les parements en béton. D'un point de vue esthétique, son utilisation pourrait augmenter encore la stabilité du parement et sa résistance vis-à-vis des agressions extérieures. L'incorporation d'un photo-catalyseur et plus particulièrement d'une poudre d'oxyde de titane permettrait en effet aux matrices cimentaires de se prémunir contre les espèces polluantes de type atmosphérique (particules organiques), liquide (traces d'hydrocarbures, encres...) ou bien naturelle (mousses et micro-organismes). D'autre part, la pollution de l'air (pour les NOx, les COV...) est un problème majeur. Une des solutions pour lutter contre cette pollution est la photo-catalyse. C'est en effet l'une des techniques les plus prometteuses pour le traitement in situ de l'air pollué.

Les nouvelles fonctionnalités apportées par la photo-catalyse concernent les propriétés anti-salissures, anti-fongiques et/ou bactéricides et la décontamination de l'air. Ces propriétés peuvent être obtenues à l'aide de matériaux photo-catalyseurs tels que les oxydes de titane dopés ou non par un traitement physique ou chimique. La photo-catalyse peut induire un autre phénomène particulièrement intéressant pour tous les

matériaux de construction : la super-mouillabilité. Ce phénomène est à la base de la formation des surfaces auto-nettoyantes, principe déjà utilisé pour certains verres. En plus de provoquer la décomposition des espèces organiques, les oxydes de titane limiteraient le dépôt des salissures. L'eau de pluie ou de lavage formerait un film à la surface du photo-catalyseur qui, en s'écoulant, faciliterait l'entraînement des impuretés.

Les produits en béton plus particulièrement concernés sont, dans le domaine de la construction, les éléments architecturaux, les éléments de toiture, le mobilier urbain et les éléments de clôture et dans le domaine du génie civil, les produits de voirie (pavés, dalles, bordures) et d'habillage des ouvrages d'art (coques, corniches de pont et garde-corps). Plusieurs modes de traitement des produits en béton semblent envisageables tels que l'incorporation des constituants photo-catalytiques dans la masse du béton, l'imprégnation de la surface avec une solution contenant un photo-catalyseur, celle-ci pouvant être réalisée par pulvérisation après durcissement du béton ou par coulage du béton frais sur un gel-coat contenant le photo-catalyseur déposé en fond de moule.

Ce procédé permet d'ajouter une, voire deux nouvelles fonctions aux produits en béton : une fonction liée à la propriété d'auto-nettoyage et une contribution vis-à-vis de l'environnement. Il devrait permettre de valoriser davantage les matériaux de construction dans la lutte contre l'encrassement des surfaces et la pollution atmosphérique. Un certain nombre de points nécessitent toutefois davantage d'investigations, notamment en ce qui concerne le mode d'introduction du photo-catalyseur dans le béton, l'efficacité et la durabilité des mécanismes. Les études actuellement en cours de réalisation, notamment dans le cadre du projet européen Picada, devraient apporter les réponses à ces questions et confirmer l'intérêt de ce procédé.

3. CONCLUSION

Du point de vue du comportement optique, le béton peut être assimilé à un matériau diffusant, donc caractérisé par un coefficient de diffusion et un coefficient d'absorption. Les phénomènes optiques vis-à-vis du béton tels que l'absorption et la diffusion sont responsables de sa teinte, et sont liés à ses caractéristiques microstructurales. D'une manière générale, la teinte du béton résulte d'une association de différents paramètres dont les principaux sont la teinte des éléments les plus fins, le rapport E/C, l'effet de paroi, les caractéristiques de surface du béton (nature et taille des assemblages minéralogiques, porosité, degré de saturation).

La préfabrication est particulièrement adaptée à la réalisation d'éléments architecturaux. Les procédés de fabrication et les performances des bétons permettent de produire une grande diversité de parements de natures, de formes, de teintes, de textures et de traitements de surface très variés. Les nouveaux bétons tels que les BAP, les BFUP et les bétons auto-nettoyants augmentent encore les possibilités. Ces bétons permettent de réaliser des produits esthétiques, élancés, encore plus durables et résistants aux salissures. L'utilisation de ces nouvelles technologies est croissante. Elles permettront aux architectes de dessiner des structures encore plus audacieuses et de concevoir des ouvrages plus performants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Cahier des charges « Eléments architecturaux en béton fabriqués en usine » Qualif-IB.

Bresson J., 1995, Recommandations pour obtenir un bel aspect en démoulage différé, Mémento Production du CERIB, pp. 243 - 251.

Campbell D. H., 1999, Microscopical examination and interpretation of portland cement and clinker, Second edition, Published by Portland Cement Association, 202 pp..

Cyr M., 1999, Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires, Thèse INSA Toulouse, pp. 94 - 103.

Darcemont M., 1982, « L'esthétique des parements en béton » dans Le béton hydraulique, J. Baron et R. Sauterey, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 467 - 479.

Desvignes, 1992, Radiométrie et photométrie, Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et contrôle, R 6410, 20 pp..

Geoffray J.M., 1991, Défauts d'aspect des parements en béton, guide technique du LCPC.

- Hermann K., 1993, Produits de décoffrage, Bulletin du Ciment, N° 15.
- Hornain H., 2001, Valeurs numériques de l'indice de réfraction des C-S-H transmises au CERIB.
- Kowaliski P., 1990, Vision et mesure de la couleur, Collection Physique fondamentale et appliquée, Éditions Masson, pp. 47 - 52.
- Kreijger P. C., 1984, The skin of concrete: composition and properties, Matériaux et Construction, pp. 699 - 707.
- Kubelka P., 1948, New contributions to the optics of intensely light-scattering materials, Part I, Journal of the Optical Society of America, Vol. 38, N° 5, pp. 448 - 457.
- Lallemant I., 2001, Hétérogénéités de teinte des parements en béton : caractérisation et identification des mécanismes. Thèse, Université Cergy Pontoise, 285 pp.
- Linder R., 1975, Formen und Schalungen für Betonfertigteile, Betonwerk und Fertigteil-Technik, N° 3.
- McCrone W.C. et Dely J.G., 1973, The particle Atlas, Edition two, Volume II : the light microscopy atlas, pp. 370 - 423.
- Miragliotta R., 2000, Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués-Prise en compte des effets de paroi, Thèse, Université La Rochelle, 221 pp.
- Pickel U., 1974, Über den Einfluss des Wasserhaushaltes an den Sichtflächen des Betons, Betonwerk und Fertigteil-Technik, N° 11.
- Silvy J., 1980, Étude structurale de milieux fibreux : cas des fibres cellulosiques, Thèse, Institut national polytechnique et université scientifique de Grenoble, 166 pp.
- St John D. A., Poole A. W. et Sims I., 1998, Concrete petrography, Éditions Arnold, 474 pp.
- Wolf E., 1968, Progress in optics, North-Holland publishing Company-Amsterdam, pp. 111 - 129.
- Wyszecki G. et Stiles W. S., 1967, Color Science : concepts and methods, quantitative data and formulas, John Wiley and Sons, Inc., pp. 186 - 189.

Exemples d'ouvrages réalisés à partir d'éléments architecturaux préfabriqués

Lyon
Infogrames Siège Mondial
Bowdler



Marne la Vallée
Les Arènes de Picasso
Manolo Nunez



Viaduc TGV Nord
Corniches
SNCF