

Béton architectonique

par **Marcel HUREZ**

*Ingénieur au département Conception des ouvrages du Centre d'études
et de recherches de l'industrie du béton (CERIB)*

1. Le béton, matériau de structure	C 2 232 - 2
1.1 Généralités	— 2
1.2 Caractéristiques physiques et mécaniques	— 2
2. Le béton, matériau d'expression architecturale	— 3
2.1 Types de béton architectonique	— 3
2.2 Forme des éléments	— 3
2.3 Reliefs ou modénatures de surface	— 4
2.4 Teinte des bétons	— 5
2.4.1 Présentation	— 5
2.4.2 Pigments de coloration	— 5
2.4.3 Teinte des granulats	— 6
2.4.4 Combinaison de teintes	— 6
2.5 États de surface ou textures	— 8
2.5.1 Surfaces brutes	— 8
2.5.2 Surfaces traitées	— 8
2.5.3 Quelques parements spéciaux	— 10
3. Composition du béton architectonique	— 11
3.1 Formulation	— 11
3.2 Choix des constituants	— 11
4. Critères de choix technico-économiques	— 12
5. Mise en œuvre du béton architectonique	— 14
5.1 Généralités	— 14
5.2 Béton architectonique porteur coulé en place	— 14
5.3 Béton architectonique porteur préfabriqué	— 15
5.4 Béton architectonique non porteur préfabriqué	— 15
5.5 Quelle méthode de mise en œuvre choisir ?	— 17
6. Contrôle des aspects de surface	— 17
6.1 Échantillons témoins	— 17
6.2 Qualité de la texture	— 17
6.3 Écarts de teinte	— 17
7. Durabilité	— 17
8. Entretien	— 19
8.1 Origine et nature des altérations	— 19
8.2 Traitement des salissures et des altérations des parements	— 19
8.3 Taches diverses	— 20
8.4 Salissures d'origine bio-organique	— 20
8.5 Salissures liées à l'environnement	— 20
8.6 Fissures et écaillage dus aux cycles de gel-dégel	— 20
8.7 Efflorescences	— 20
8.8 Corrosion des armatures	— 23
8.9 Modifications de la teinte des parements colorés	— 23
8.10 Faïençage des surfaces brutes de démoulage	— 23
Pour en savoir plus	Doc. C 2 232

Le béton architectonique a commencé à être employé très tôt avec les premières réalisations de François Coignet qui breveta cette « pierre artificielle » en 1869. Des éléments d'habillage très décoratifs furent réalisés en béton gris ou coloré, dans des moules en bois, pour la réalisation d'un habillage de pont. On peut également citer les réalisations exemplaires d'Auguste Perret qui a su mettre en valeur l'aspect esthétique du béton en créant, sur la structure même des édifices, des surfaces contrastées lisses et bouchardées. Lloyd Wright, dans ses réalisations de maisons à Los Angeles, a cherché à révéler les « secrets » de la matière en travaillant fortement les aspects de surface de blocs de façade plus ou moins baignés de soleil.

L'architecture moderne, ensuite, poussée par le besoin grandissant en logements, a peu utilisé ou fait évoluer ces premiers traitements de surface. Elle a plutôt favorisé le rationalisme et l'industrialisation, et a parfois éliminé de nombreux détails de réalisation importants pour la pérennité et la durabilité de l'ouvrage (gouttes d'eau, corniches, appuis de fenêtre débordants...) entraînant de ce fait un vieillissement prématuré des façades.

On a reproché alors à ce matériau son aspect froid, lié à cette architecture d'urgence – qualifiée de rectangulaire, rigide, abstraite ou décharnée – souvent associée aux grands ensembles d'après-guerre.

Pour tenter d'« humaniser » l'aspect du béton, un certain nombre d'architectes et de plasticiens ont travaillé son esthétique, pour offrir tout un ensemble de traitements de surface innovants et créer ce que l'on appelle aujourd'hui le béton architectonique.

Quatre techniques distinctes permettent de réaliser un béton architectonique : forme générale de l'élément, textures ou modénatures de surface, couleurs et aspects (lavé ou désactivé, sablé, bouchardé, poli, grenailé, acidé, etc.). L'architecte utilise ces différentes possibilités pour concevoir des éléments de façade, d'habillage et de décoration, porteurs ou associés directement à la structure de l'ouvrage. Ces éléments sont utilisables aussi bien dans le domaine du bâtiment que celui du génie civil, ainsi que dans la réalisation d'espaces urbains ou paysagés.

1. Le béton, matériau de structure

1.1 Généralités

Le béton est un **matériau de construction** capable de répondre aux multiples contraintes et exigences imposées aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil : stabilité mécanique, étanchéité, tenue au feu, isolation acoustique, inertie thermique, durabilité, respect de l'environnement et, bien entendu, aspect de surface. Un exemple d'ouvrage de génie civil est donné sur la figure 1.

Le béton est constitué de minéraux solides, tels que le ciment (gris ou blanc), les sables, les gravillons et les colorants mélangés avec de l'eau et des adjuvants pour lui donner sa plasticité à l'état frais et lui permettre d'acquiescer à l'état durci les caractéristiques physico-chimiques recherchées.

Il présente les **qualités** spécifiques suivantes :

- **matériau moulable à froid** : il permet la réalisation de toutes formes, dimensions et détails de parement ;

- **matériau composite** : il offre une gamme illimitée d'aspects de surface et de performances par le vaste choix de constituants, de compositions, de moules et de traitements de surface ;

- **matériau minéral durable** : il est capable de résister, selon sa composition, à des environnements sévères ;

- **matériau économique** : c'est l'un des matériaux de base les moins chers du marché ; son coût est adaptable aux besoins de l'utilisateur ; il est fonction des performances recherchées.

1.2 Caractéristiques physiques et mécaniques

Elles résultent essentiellement de la composition du béton (constituants et dosages) et des techniques de fabrication employées (compactage, vibration, durcissement, cure).

Pour accélérer son durcissement, le béton peut subir un traitement thermique (figure 2).

■ Caractéristiques principales des bétons de granulats courants

Masse volumique : 2 300 à 2 500 kg/m³.

Résistance en compression à 28 jours (f_{c28}) : 30 à 80 MPa (1 MPa = 10 daN/cm²). La résistance en compression avant 28 jours (f_{cj}) est définie selon la courbe de la figure 2.

Résistance à la traction : environ un dixième de la résistance à la compression.

Classement de réaction au feu : incombustible.



Figure 1 – Centre d'entretien routier. Argentueil [Béguin et Macchini]

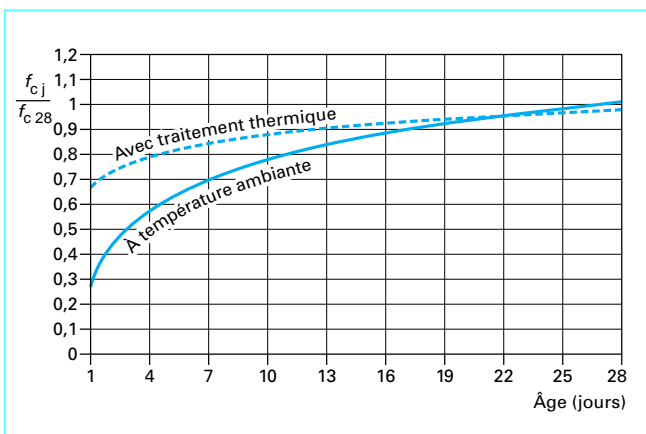


Figure 2 – Résistance en compression du béton avant 28 jours (courbe type)

2. Le béton, matériau d'expression architecturale

2.1 Types de béton architectonique

On distingue habituellement trois types de béton architectonique, qui sont utilisés aussi bien en bâtiment que dans le domaine du génie civil :

- le **béton blanc**, composé uniquement de constituants blancs (ciment, sables, gravillons en particulier) ;

- le **béton clair**, constitué d'un ciment blanc associé à des granulats de couleur claire ; sa teinte ne dépend que des granulats (aucun colorant complémentaire) ;

- tous les **autres bétons architectoniques**, qui peuvent être réalisés à partir d'un mélange de ciments blancs ou gris, et faire appel à tout type de granulats compatibles avec l'application envisagée ; ils peuvent être teintés à l'aide de pigments de coloration (oxydes métalliques en particulier) pour assurer une bonne stabilité de la teinte dans le temps.

En complément à ce classement, l'expression architecturale recherchée par le maître d'œuvre s'exprime plus singulièrement à l'aide des quatre facteurs suivants : forme, reliefs ou modénatures, teintes, états de surface ou textures.

Les figures 3, 4 et 5 montrent leur emploi sur différentes réalisations.

2.2 Forme des éléments

La forme générale des éléments est définie à partir des esquisses de l'architecte et des études techniques. Elle est constituée d'une association de surfaces élémentaires planes (figure 3), circulaires, réglées ou plus complexes (figure 4). La facilité de moulage et surtout de démoulage sont à prendre en considération lors de la conception des éléments.

Les **moules de fabrication** sont aujourd'hui constitués de matériaux très divers : acier, bois, matière plastique, polystyrène expansé moulé ou sculpté, caoutchouc, élastomère.

Le **choix du matériau** constituant les moules est fonction du nombre de pièces à réaliser et de la complexité de la réalisation (détails, finesse du moulage...).



Figure 3 – Centre administratif Air Inter. Toulouse Blagnac [M. Perruchot, T. Gras, M. Pupazan]



Figure 4 – Forme complexe qui a nécessité l'utilisation d'un béton précontraint par prétension. Candélabres, Issy-les-Moulineaux
[Flore Bringand]



Figure 5 – Ensemble de balcons réalisés en béton blanc sablé. Immeuble Florestan, Monte-Carlo [Michel Herbert]

- Le **coût** de réalisation d'un élément est intimement lié à la complexité de réalisation des moules, et au nombre de pièces coulées avec le même appareillage. Son estimation nécessite une étude préalable réalisée avec l'entreprise ou le préfabricant.
- Les **moules en bois** sont utilisables pour des réalisations ne dépassant pas une trentaine de pièces. Au-delà, ou pour des fabrications de grande précision, un **moule métallique** est nécessaire.
- Les conditions probables de **vieillissement** des éléments doivent être appréhendées lors de la conception (cheminement de l'eau, risques de salissures avec certaines formes, comportement des joints) (§ 7).



Figure 6 – Garde-corps réalisé en moule élastomère
[Barbier, Dolbeck, Mestoudjian]



Figure 7 – Surface réalisée à l'aide d'une matrice élastomère

2.3 Reliefs ou modénatures de surface

Pour animer la surface des éléments architecturaux, le concepteur peut avoir recours à des **reliefs**, en saillie ou s'incrystant dans le plan moyen de la surface à réaliser (figure 5).

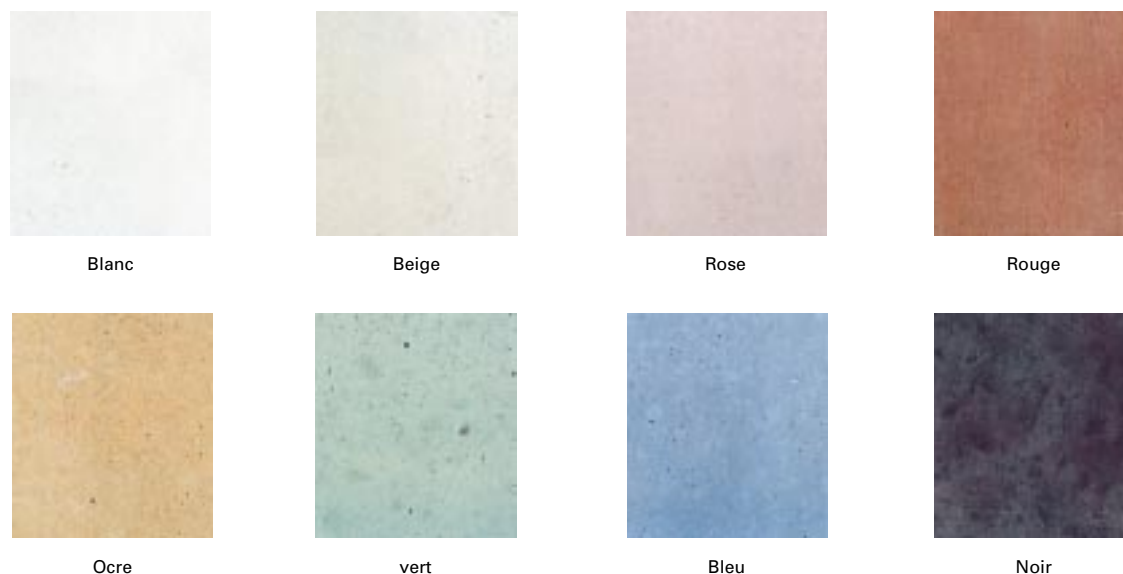
Ils créent des jeux d'ombre et de lumière, des dessins et des formes géométriques renforçant la qualité esthétique du parement, et sont réalisés à partir de moules ou matrices de coffrage en **matériaux** variés : bois, matière plastique, élastomère (figure 6), polystyrène expansé, moulé ou sculpté.

Certaines matrices sont proposées sur catalogue par des fournisseurs spécialisés, mais elles sont la plupart du temps créées à la demande.

Les reliefs peuvent également être obtenus par incrustations ou incorporations d'éléments décoratifs déposées directement en fond de moule (pierres, galets, etc.) selon une modénature qui peut être pseudo-aléatoire ou au contraire bien ordonnée.

Avec les **moules rigides**, la forme des reliefs doit bien entendu autoriser le démoulage. Les moules **souples** tels que ceux en élastomère (figure 7) sont bien adaptés aux formes complexes munies de nombreuses aspérités géométriques et de contre-dépouilles (formes géométriques s'opposant au démoulage).

Tableau 1 – Exemples de bétons bruts teintés



2.4 Teinte des bétons

2.4.1 Présentation

En jouant sur les constituants, leurs dosages et les traitements de surface des bétons, il est possible de réaliser une grande variété de teintes.

■ La teinte des **bétons bruts de démoulage** dépend principalement des constituants les plus fins : pigments, ciments, fillers, sables.

■ La teinte des **bétons traités** (surfaces lavées, désactivées, sablées, bouchardées, polies) est liée à la couleur des gros éléments tels que les gravillons et les gros grains de sable.

Selon le type de traitement appliqué et sa profondeur, le mortier de liaison visible entre les gros grains, peut jouer un rôle plus ou moins prononcé sur l'aspect général de surface. Sa teinte peut s'harmoniser avec celle des granulats, pour donner à la surface un aspect homogène. Elle peut également s'en écarter pour créer un contraste faisant ressortir la couleur des gravillons.

■ Il existe des **nuanciers** qui présentent des palettes de bétons teintés et traités selon différents aspects. De nombreuses possibilités de nuances peuvent être envisagées et mises au point selon le souhait et le projet de l'architecte. Le tableau 1 donne quelques exemples de bétons bruts teintés.

2.4.2 Pigments de coloration

Les pigments contribuent largement à l'obtention de teintes ou de nuances particulières des bétons bruts ou traités. Ils sont ajoutés en faible quantité dans le béton (1 à 6 % du poids du ciment en moyenne).

Le ciment blanc est la plupart du temps utilisé pour réaliser les bétons colorés. Les pigments sont associés de préférence avec des sables et des granulats de même couleur. Ils permettent d'obtenir

une palette étendue de teintes : jaune, ocre, rouge, brun, marron, noir, vert, bleu... Il est possible de les combiner pour obtenir des teintes intermédiaires.

L'emploi de pigments est quasiment indispensable lorsque l'on souhaite obtenir des bétons de teinte soutenue (par exemple rouge, brun, noir, bleu ou vert). Dans ce cas, le pigment vient le plus souvent renforcer la teinte des granulats.

Il est également possible d'utiliser des pigments pour obtenir une meilleure homogénéité de la teinte des bétons de ciment gris.

Pour garantir une **coloration stable dans le temps**, les pigments doivent être de préférence d'origine minérale et appartenir à l'une des catégories du tableau 2.

Il est à noter qu'une légère variation de teinte du béton peut s'observer aux jeunes âges. Elle se stabilise, en général, au bout de 3 à 4 mois environ.

Tableau 2 – Tableau comparatif des différents pigments

Catégories de coloration	Couleurs	Durabilité
Synthétiques à base d'oxydes de fer (les plus utilisés)	rouge, jaune, brun, noir	excellente
Synthétiques à base de : — dioxyde de chrome — dioxyde de titane	vert blanc	excellente
Synthétiques à base d'oxydes métalliques complexes	vert clair, jaune vif, ocre clair, bleu	excellente
Naturels à base de terres (régularité des teintes à vérifier)	rouge, ocre, brun	très bonne
Naturels à base de minerais de fer ou de ferromanganèse	ocre, rouge, brun, noir	très bonne

2.4.3 Teinte des granulats

Les sables et gravillons sont disponibles dans une large variété de teintes naturelles. Le traitement de surface appliqué au béton permet de faire apparaître, de façon plus ou moins marquée, la teinte des grains fins du sable (par exemple par sablage) ou celle des gros grains (par lavage profond ou polissage).

Le tableau 3 donne la teinte de quelques granulats en fonction de leur nature minéralogique.

Tableau 3 – Teinte de quelques granulats en fonction de leur nature minéralogique	
Nature du granulat	Teintes
Basalte	noir ou bleu-noir
Calcaire dur et marbre	noir, bleu, rose, beige, blanc, vert
Calcaire moyen	beige, blanc, rosé
Diorite	bleu ou rose
Granite	jaune, rose, gris, vert
Grès	rouge
Porphyre	rouge, bleu, gris-bleu, gris
Quartzite	rose, gris
Silex	beige ou bistre

- Les sables et gravillons utilisés en béton de parement sont avant tout sélectionnés pour leurs caractéristiques d'aspect : couleur et forme.
 - Les granulats doivent être conformes aux spécifications de la norme XP P 18-540.
 - Le choix des granulats fait intervenir différents critères techniques liés à l'utilisation envisagée et à leur durabilité : gélivité, humidité, abrasion, chocs, agressions environnementales, comportement chimique en présence d'autres constituants. Ils doivent, par ailleurs, être compatibles avec les traitements de surface envisagés et doivent résister aux opérations d'entretien et de nettoyage prévisionnels.
- À titre d'information, le tableau 4 donne une liste non exhaustive de granulats utilisables en parement.

2.4.4 Combinaison de teintes

- La **combinaison de granulats** de teintes différentes ou complémentaires au sein d'une même composition de béton permet d'obtenir des effets de teinte particuliers : granités, mouchetés.
- Il est également possible d'obtenir :
- des veinages ou autres effets spéciaux résultant d'une mixité de deux ou trois bétons de teintes différentes (figure 8) ;
 - des dessins géométriques par la juxtaposition de bétons de teintes différentes sur une même surface (par moulage simultané) (figure 9) ;
 - des reliefs de couleurs différentes, obtenus également par moulage simultané.

■ Influence du ciment sur les teintes

Les ciments blancs et gris sont souvent mélangés avec des pigments de colorations diverses.

- Les **ciments gris** peuvent, selon leur composition et leur origine, apporter aux bétons des teintes plus ou moins claires.



Figure 8 – Éléments en béton blanc poli incrusté d'un béton de granulats naturels de couleur gris-bleu ou ocre, disposés aléatoirement en partie basse. Extension du Palais des congrès, Paris [Ch. de Portzamparc]



Figure 9 – Panneaux de façade en béton noir et blanc, côte à côte et sans faux joint. Maison du temps libre, Paray-Vieille-Poste [R. Barrot]

Il faut noter également que la teinte grise de la peau d'un béton brut peut varier en fonction de nombreux facteurs liés soit à la fabrication (conditions de cure), soit aux conditions climatiques subies par l'élément après démoulage. Un léger gommage (sablage fin de la surface) permet, si nécessaire, d'améliorer l'homogénéité de la teinte.

Tableau 4 – Exemples de granulats utilisables en parement
(liste non exhaustive)

Couleur	Dénomination	Nature	Origine
Beige	Brignoles	Calcaire	Var (83)
Beige	Comblanchien	Calcaire	Côte-d'Or (21)
Beige	Hauteville	Calcaire	Ain (01)
Beige-rosé	Vignat	Quartzite	Orne (61)
Blanc	Carrare	Marbre	Italie
Blanc	Inzinzac	Quartz	Morbihan (56)
Blanc	Jura	Marbre	Ain (01)
Blanc	Pierre d'Écuellen	Calcaire	Seine-et-Marne (77)
Blanc	Rhin	Siliceux	Bas-Rhin (67)
Bleu	Bleu Turquin	Marbre	Haute Garonne (31)
Bleu	Meilleraie	Microdiorite	Vendée (85)
Bleu	Pierre bleue de Givet	Calcaire	Ardennes (08)
Bleu	Rivolet	Porphyre	Rhône (69)
Bleu	Saint-Nabord	Porphyre	Bas-Rhin (67)
Bleu-blanc	Cayeux	Silex	Somme (80)
Bleutée	Gourin	Quartzite	Morbihan (56)
Couleurs variées	Saint-Béat	Marbre	Haute-Garonne (31)
Gris	Perrières	Quartzite	Calvados (14)
Gris	Vallée Heureuse	Calcaire	Pas-de-Calais (62)
Gris-bleu	Pont de Colonne	Porphyre	Côte d'or (21)
Gris-bleu	Rocher coupé	Cornéenne	Ile-et-Vilaine (35)
Gris-bleu	Voutré	Porphyre	Mayenne (53)
Gris-clair	Boulonnais	Marbre	Pas-de-Calais (62)
Jaune	Palvadeau	Alluvions siliceuses	Vendée (85)
Jaune	Saint-Gilles	Siliceux	Belgique
Jaune	Sienna	Marbre	Italie
Jaune	Taunus	Siliceux	Allemagne
Jaune-ocre	Vergèze	Silico calcaire	Gard (30)
Noir	Raon-l'Étape	Basalte	Vosges (88)
Orange	Saint-Martin-Belle-roche	Calcaire	Saône-et-Loire (71)
Rose	Fréhel	Quartzite	Sarthe (72)
Rose	Pléhédél	Grès-quartzite	Côte-d'Armor (22)
Rose	Roche-en-Brenil	Granite	Côte-d'Or (21)
Rose	Vœgtlinshoffen	Quartzite	Haut-Rhin (68)
Rouge	Ligron	Porphyre	Deux-Sèvres (79)
Rouge	Montauté	Porphyre	Nièvre (58)
Rouge	Mouen	Grès	Calvados (14)
Rouge	Vitrolles	Calcaire	Bouches-du-Rhône (13)
Rouge	Vosges	Grès	Bas-Rhin (67)
Rouge + couleurs variées	Vérone	Marbre	Italie
Vert	Men Arvor	Schiste	Morbihan (56)

● Les **ciments blancs** qui ont des compositions très proches de celles des ciments gris, permettent notamment la réalisation de bétons clairs dont la teinte est généralement obtenue à partir de sables naturels de couleur claire : beige, ocre, rose.

2.5 États de surface ou textures

De nombreux états de surface peuvent être obtenus soit directement par les empreintes du moule, soit par traitements de finition après coulage et démoulage. Les surfaces sont classées par **catégorie** selon la dénomination suivante :

- brutes, contre moule, hors ou dessus de moule ;
- traitées ;
- revêtues ;
- destinées à être peintes, lasurées ou revêtues (briques, pierres...).

2.5.1 Surfaces brutes

Elles peuvent être lisses ou à reliefs (figure 10) et être obtenues par démoulage immédiat ou différé.

On distingue :

- les surfaces brutes **contre moule** (durcies sur une paroi de moule) ;
- les surfaces brutes **hors moule**, c’est-à-dire travaillées à l’état frais (par talochage, lissage ou impression).

Le tableau 5 présente ces différentes surfaces.

Tableau 5 – Définition des surfaces brutes		
Catégorie de surface	Type d’aspect	Obtention et description de l’aspect
Brute contre moule	Brut, durci moule	Surface lisse ou à reliefs. Similaire à la paroi du moule.
	Brut, démoulage immédiat	Aspect de surface correspondant au glissement ou au décollement du moule sur le béton frais.
Brute hors moule	Dressé	Règle tirée sur le béton frais.
	Taloché	Passage d’une taloche sur le béton frais.
	Feutré	Passage d’une brosse souple ou d’une plaque de polystyrène expansé.
	Lissé	Passage d’une truelle ou d’une lisseuse sur le béton frais.
	Avec empreintes	Passage d’un rouleau à boucher ou d’un instrument similaire sur le béton frais.

La figure 11 donne un exemple de surface brute réalisée en béton à très haute performance, employé pour la réalisation d’un écran acoustique.

2.5.2 Surfaces traitées

Elles sont traitées soit à l’état frais, soit à l’état durci, selon les méthodes présentées ci-après.



Figure 10 – Mur de soutènement en béton brut avec éléments préfabriqués structurés. Autoroute A 40



Figure 11 – Surface brute en béton à très haute performance, employée pour la réalisation d’un écran acoustique

Tableau 6 – Définition des surfaces traitées à l’état frais	
Type d’aspect	Obtention 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.

- Les **surfaces traitées à l’état frais** sont définies dans le tableau 6.
- Les **surfaces traitées à l’état durci** sont définies dans le tableau 7. Des exemples sont donnés dans la figure 12.

Tableau 7 – Définition des surfaces traitées à l'état durci

Type d'aspect	Obtention et description de l'aspect	Exemple
Désactivé	Mise en place d'un désactivant lors du coulage. La surface est ensuite découpée au jet d'eau ou brossée pour faire apparaître les granulats.	figures 12a
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.	figure 12b
Sablé (basse ou haute pression)	La surface est attaquée à l'aide d'un jet de sable faisant apparaître plus ou moins les granulats. <i>Traitement appliqué en préfabrication.</i>	figure 12c
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. <i>Traitement appliqué en préfabrication.</i>	figure 12d
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 (polissage 3 passes) ou brillante (polissage 5 passes), traitée ou non avec un bouche-pores.	figure 12e
Gommé	Sablage extrêmement fin de la surface pour procéder à une homogénéisation de l'aspect ou à un nettoyage.	
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.	
Éclaté	Parement cassé par fendage faisant apparaître l'ensemble des constituants avec cassure des gros granulats.	

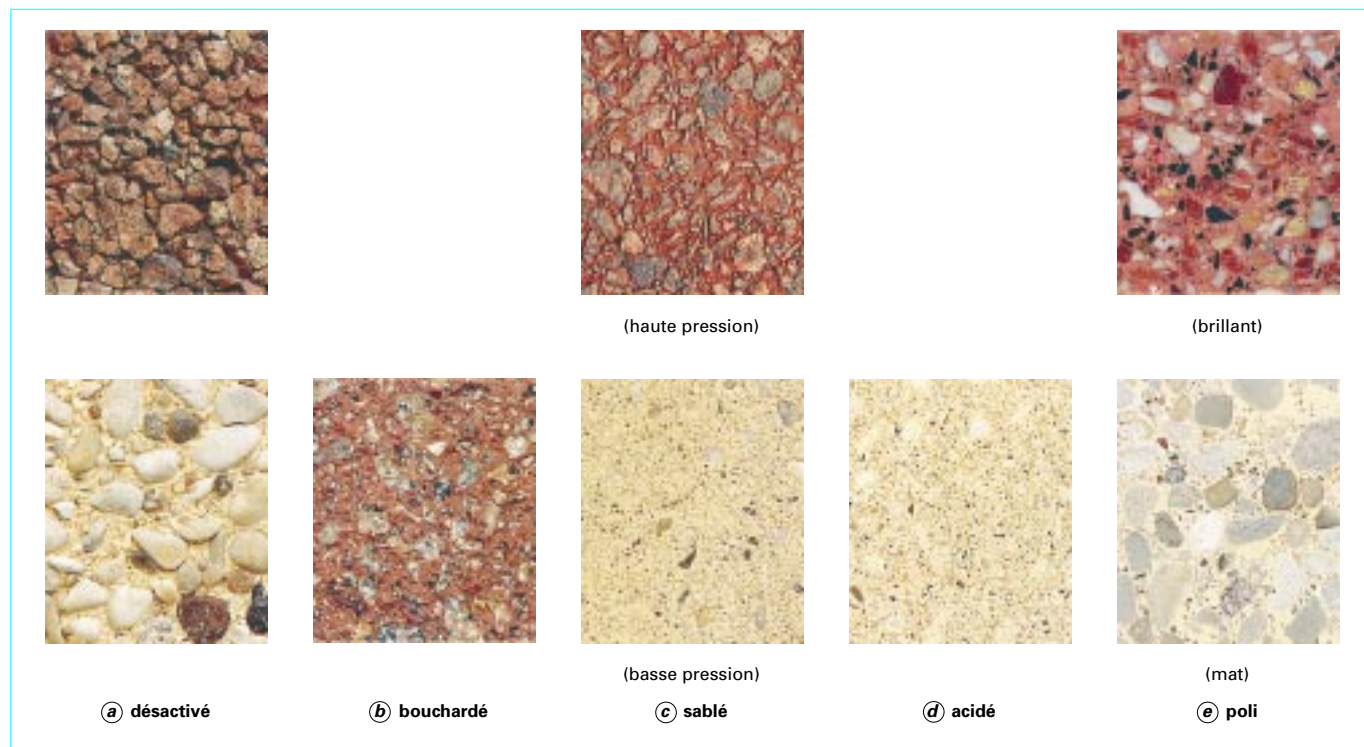


Figure 12 – Exemples de bétons traités à l'état durci



Figure 13 – Parement constitué de deux types de bétons de teintes différentes. Pacific Tower. La Défense
[K. Kurokawa]

2.5.3 Quelques parements spéciaux

Le béton architectonique, du fait de sa facilité de mise en œuvre, permet à l'architecte de rechercher, avec l'appui d'un préfabricant ou d'un spécialiste du béton, de nouvelles méthodes d'expressions originales. Un exemple est donné sur la figure 13.

L'évolution des formulations de béton et des outils de fabrication, l'arrivée sur le marché de technologies économiquement rentables vont permettre de faire progresser la palette des traitements de surface offerts. En voici deux exemples.

■ Béton photographé

Ce procédé permet de reproduire, selon un procédé similaire à la sérigraphie, une photographie à l'échelle souhaitée, sur une paroi en béton. Un « négatif » un peu particulier est réalisé. Il est revêtu d'une encre retardatrice de prise permettant de reproduire le modèle sur le béton. Après 24 heures environ, la plaque de béton est démoulée puis lavée au surpresseur à eau froide pour éliminer les parties désactivées et faire apparaître le modèle.

Ce procédé est aujourd'hui parfaitement au point et permet de réaliser des reproductions avec des dégradés d'une très grande finesse (figure 14).

■ Béton revêtu de métal ou de polymère

Ce procédé innovant consiste à déposer par projection, à l'aide d'un chalumeau spécial, du métal ou un polymère en fusion sur la surface du béton. L'intérêt de ce traitement est double : offrir de nouveaux états de surface et améliorer la durabilité du béton.



Figure 14 – Béton photographé : exemple

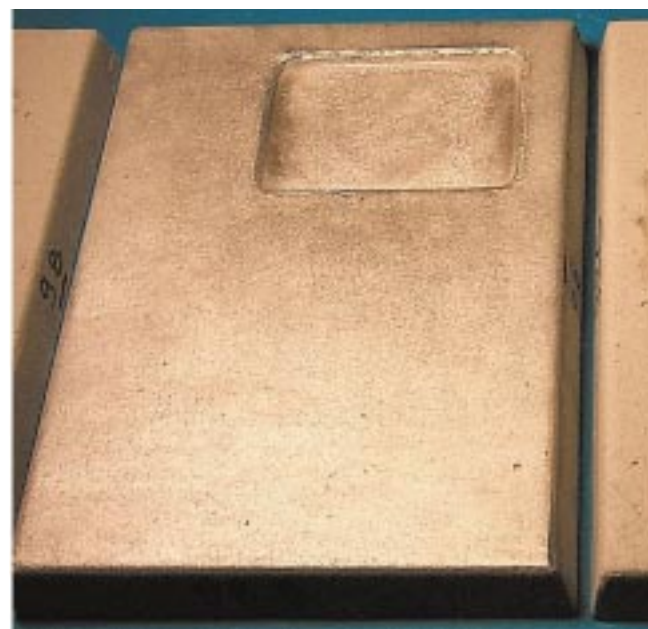


Figure 15 – Béton recouvert d'un revêtement métallique par projection thermique

Plusieurs matériaux sont actuellement utilisés dont le cuivre, l'aluminium, le laiton et le bronze.

Des tests de durabilité sont en cours pour vérifier, d'une part, le bon accrochage du matériau projeté sur la surface et, d'autre part, son vieillissement dans le temps.

À moyen terme ce traitement pourrait être utilisé par exemple dans le mobilier urbain, la décoration de façades, les produits de voirie et de revêtement de sol. Un échantillon de ce procédé est présenté sur la figure 15.

3. Composition du béton architectonique

Elle doit être adaptée à l'ouvrage à réaliser : performances, environnement (durabilité), traitements de surface envisagés.

Pour atteindre les performances recherchées, les constituants doivent être parfaitement identifiés. Ils doivent être conformes aux principales normes en vigueur.

3.1 Formulation

■ Pour les **bétons** prêts à l'emploi destinés à être **coulés sur chantier**, les formulations des bétons doivent suivre les règles indiquées dans la norme XP P 18-305.

■ Pour les **bétons préfabriqués**, le Cahier des charges des éléments architecturaux en béton fabriqués en usine, édité par la FIB, s'applique.

3.2 Choix des constituants

■ Ciments

Ils peuvent être blancs ou gris, selon la teinte et l'effet de finition recherchés, les granulats et colorants utilisés.

Ils sont conformes aux spécifications de la norme NF P 15-301. Leur choix doit être adapté aux conditions environnementales.

■ Granulats

Ils doivent satisfaire à la norme XP P 18-540. Leur choix (roulé ou concassé, teinte, dimensions) est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques recherchées.

Le tableau 4 donne une liste de granulats utilisables en parement ; on trouve leur teinte dans le tableau 3.

● Pour les **bétons polis** (figure 16), les granulats doivent avoir une texture et une porosité choisies en fonction du type de traitement (mat ou brillant) :

- granulats tendres (calcaires moyens et certains marbres) pour le polissage mat ;
- granulats mi-durs (calcaires durs, marbres, granites) pour le polissage mat ou brillant ;
- granulats durs (marbres, granites, porphyres et certains basaltes) pour le polissage brillant ; ils résistent de plus très bien aux atmosphères agressives.

● Pour les **gravillons lavés**, la classe granulaire doit être dans le rapport D/d de 3 au minimum, D et d représentant respectivement la plus grande et la plus petite des dimensions de l'appellation commerciale.

● Les **sables** sont de forme et de couleur régulières pour assurer une uniformité de la teinte et de l'aspect.

Des fillers ou fines sont ajoutés au sable s'il manque d'éléments fins. Ils proviennent impérativement de matériaux durs, siliceux ou calcaires.

● Le tableau 8 précise les principales **caractéristiques des granulats** utilisés pour les bétons architectoniques.

■ Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit répondre aux spécifications de la norme XP P 18-303. Elle ne doit pas contenir plus de 2 g de sels dissous par litre.

De plus, il est important de s'assurer de l'absence de particules ferrugineuses en suspension.

Tableau 8 – Principales caractéristiques des granulats pour bétons architectoniques

Indice de concassage (IC)	Permet d'apprécier la quantité de grains concassés. Lorsque IC > 50 %, vérifier la qualité esthétique du béton.
Propreté des granulats (P)	Influe sur la résistance du béton (défauts d'adhérence granulats/pâte). Passant au tamis de 0,5 mm < 1,5 % ou 3 % (granulats concassés).
Propreté des sables (PS) Essai complémentaire au bleu de méthylène (VB)	L' indice PS caractérise le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le sable. Plus l'indice est élevé, plus le sable est « propre ». Prendre PS > 60 pour des bétons de parement. Pour des valeurs inférieures, l' essai complémentaire au bleu de méthylène (VB) est recommandé. Plus VB est grand, plus le sable est « sale ». Prendre VB < 1.
Module de finesse d'un sable (MF)	Influe sur la plasticité du béton. Un module faible caractérise un sable fin. Pour une bonne maniabilité, prendre $1,9 < MF < 2,8$.
Coefficient d'aplatissement d'un gravillon (A)	Influe sur la mise en œuvre du béton. Cet indice croît avec la difficulté de mise en œuvre. Prendre A < 20.
Coefficient d'écoulement des sables (Ecs)	Influe sur la mise en œuvre d'un béton. Pour maintenir une maniabilité constante, fixer un écart d'environ 10 % de la valeur de référence du sable sélectionné.
Absorption d'eau (Ab)	Indicateur de tenue au gel et de durabilité. Prendre Ab < 5 % (1 % en cas de risque de gel).
Essai Los Angeles (LA)	Caractérise la résistance à la fragmentation. C'est un indicateur de tenue au gel. Un granulats résistant a un indice faible. Prendre LA < 40 (25 en cas de risque de gel).
Sensibilité au gel (G)	Elle se caractérise par cet indice ($G \leq 30$). En cas de risque de gel limiter LA à 25 et Ab à 1 %.
Alcali-réaction Classement des granulats : NR : non réactifs ; PR : potentiellement réactifs ; PRP : potentiellement réactifs à effet de pessimum (1)	Pour les utilisations exposées aux intempéries, utiliser de préférence des granulats classés NR ou PR.
Soufre total (S), Sulfates (SO ₃), Chlorures (CL)	Limites sans contrôles particuliers : S : 0,4 %, SO ₃ : 0,2 %, CL : 0,02 %
Impuretés prohibées	Charbon, pyrite, scories, gypse, mica en grande quantité, matières organiques.

(1) Les effets expansifs dus à l'alcali-réaction ne se manifestent dans ce cas que lorsque l'on atteint dans le béton une teneur critique en éléments réactifs.



Figure 16 – Éléments de façade courbe en béton poli, détail de finition. Poste de transformation EDF, Fontenay-sous-Bois
[Chambre, D. Vibert]

■ Adjuvants

L'utilisation d'adjuvants est admise dans les conditions suivantes :

- adjuvants admis à la marque NF – Adjuvants ;
- adjuvants conformes au DTU 21-4 (réalisation d'essais de convenance).

Ils ne doivent pas avoir d'influence sur la teinte du béton, être compatibles entre eux, avec le ciment et avec les traitements envisagés.

Ils sont incorporés au béton pour faciliter la mise en œuvre (plastifiants, superplastifiants) ou améliorer la durabilité ou la tenue au gel (entraîneurs d'air, hydrofuges de masse, ...). Les hydrofuges de masse permettent, en plus de leur fonction première, d'obtenir des teintes plus stables dans le temps.

■ Pigments de coloration

On choisit des oxydes métalliques naturels ou synthétiques, qui garantissent une plus grande stabilité de la couleur dans le temps.

4. Critères de choix technico-économiques

Le béton architectonique est associé aujourd'hui à la plupart des matériaux de construction : verre, acier, bois, pour offrir des solutions technico-économiques performantes, permettant à l'architecte de constituer des volumes, des enveloppes complexes et ouvertes, faciles à mettre en œuvre du fait de l'emploi de systèmes d'assemblage simples et durables. Les éléments ainsi produits pourront être porteurs, autoporteurs, portés ou suspendus à la structure.

■ Coût des bétons de parement

Selon la nature des constituants (ciment, granulats, adjuvants, colorants), un béton de parement peut atteindre 3 à 4 fois le coût d'un béton standard.

Dans ces conditions, il devient économiquement intéressant d'associer à un ou plusieurs bétons de parement un béton de masse (gris en général) d'un coût moindre. L'industriel utilise des techniques de moulage appropriées pour réaliser cette fabrication en deux ou plusieurs couches.

■ Nature du ciment (blanc ou gris)

L'aspect final recherché et l'intégration du projet dans l'environnement dictent le choix entre ciment blanc ou gris.

Quel que soit le choix du ciment, le liant doit être conforme à la norme NF P 15-301, qui en définit les caractéristiques physico-chimiques.

- Le **ciment blanc**, nécessaire pour les teintes claires ou pastel, met en valeur les sables et les granulats utilisés.

Sa régularité colorimétrique est garantie par le producteur.

- Le **ciment gris** donne également d'excellents résultats en utilisation architecturale.

■ Granulats

Le coût des granulats dépend de deux facteurs principaux : leur rareté et, surtout, leur coût de transport, qui est souvent économiquement prépondérant.

Avec un **béton traité**, la nécessité de changer de granulats pour obtenir l'aspect recherché entraîne, en règle générale, une valeur ajoutée d'environ 20 à 30 % sur le prix du béton brut équivalent. Cette valeur peut être beaucoup plus importante selon la provenance du granulats.

Le choix des granulats est finalement une opération délicate qui nécessite souvent les conseils d'un industriel ou d'un spécialiste du béton.

■ Forme des éléments

La forme a une forte incidence sur le coût d'un élément. Son importance économique est liée à la complexité du moule de fabrication à réaliser.

On cherche, lorsque cela est possible lors de l'opération de calepinage, à définir des séries de pièces réalisables avec un moule identique pour optimiser les coûts de fabrication.

La taille des éléments à fabriquer est également un facteur économique important. Des pièces de grandes dimensions tendent à faire diminuer le coût de réalisation de l'ouvrage. Toutefois les dimensions doivent rester compatibles avec les contraintes de transport et de mise en œuvre (limite de poids imposée par la grue).

■ Influence du calepinage

Cette opération, qui consiste à découper le projet en parties élémentaires, susceptibles d'être fabriquées et mises en œuvre, influence fortement le coût de réalisation. Le calepinage est, en



Figure 17 – Éléments d'habillage issus d'un calepinage rigoureux.
Cité de la musique, La Villette [Ch. de Portzamparc]

général, piloté par l'architecte, en relation avec le préfabricant, le bureau d'études et l'entreprise de mise en œuvre (figure 17).

C'est un paramètre déterminant sur le coût de réalisation ; ses principaux facteurs d'influence sont :

- les formes et modénatures retenues, définissant le coût de base du moule ;
- le nombre d'éléments à fabriquer, de manière unique ou en petites séries ; leur quantité est fonction de la modénature adoptée, des dimensions et du poids des éléments, liés aux contraintes de transport et de mise en œuvre (capacité de la grue de chantier) ; des dimensions de l'ordre de 6 à 8 m conduisent en général aux coûts les plus faibles ;
- les délais de réalisation ; ils déterminent, selon le planning prévisionnel, le nombre de moules à mettre en œuvre pour fabriquer les éléments.

- Une diminution de délai peut conduire à augmenter le nombre de moules de fabrication. Elle entraîne, par voie de conséquence, une élévation du coût de production.
- Un calepinage bien réalisé doit conduire à minimiser le nombre de composants différents du projet. La recherche de pièces semblables permet de constituer des séries d'éléments utilisant un moule de fabrication commun, permettant de diminuer le coût de production ; la figure 18 en donne un exemple.

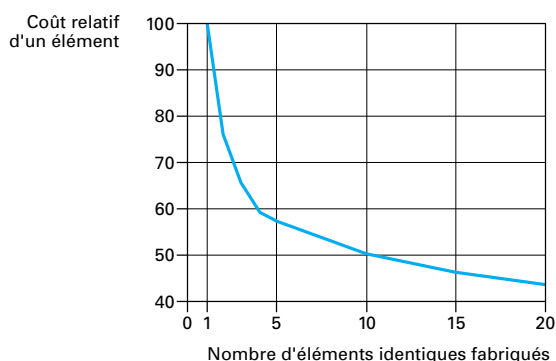


Figure 18 – Coût relatif d'un élément selon la série fabriquée par un même moule

■ Reliefs

Les remarques précédentes s'appliquent également pour les reliefs : il faut chercher à amortir leurs coûts sur des séries de pièces.

Les reliefs proposés **sur catalogue** sont à utiliser en priorité, car en général moins onéreux (plus-value d'environ 10 % sur le coût d'un parement brut). Ils permettent d'être réemployés 10 à 80 fois, selon leur complexité.

L'emploi de **matrices spécifiques** à un projet permet l'obtention de parements inédits, d'expression architecturale plus riche. De nombreuses matrices sont réalisées à partir de pièces existantes (statues, reliefs spécifiques). Leur coût fait toujours l'objet d'un devis préalable.

■ Teinte

Le choix du pigment de coloration est un paramètre important du coût du matériau.

Le tableau 9 donne une base comparative de coûts pour des bétons blancs, avec ou sans colorants.

Tableau 9 – Coûts comparatifs de bétons blancs, avec colorants

Catégories de colorants	Couleurs	Incidence sur le coût du béton (par rapport au béton sans colorant)	Incidence sur le coût du produit fini (1)
			(%)
Synthétiques à base d'oxydes de fer (les plus utilisés)	rouge	1,5 à 2	+ 8
	jaune	1,5 à 2,7	+ 12
	brun	1,1 à 1,4	+ 6
	noir	1,5 à 2	+ 8
Synthétiques à base de : — dioxyde de chrome — dioxyde de titane	vert	1,4	+ 10
	blanc	1,25	+ 8
Synthétiques à base d'oxydes métalliques complexes	vert clair, jaune vif	2 à 2,7	+ 12
	ocre clair	1,1 à 1,4	+ 6
	bleu	3 à 4,6	+ 30
Naturels à base de terres	rouge, ocre, brun	1,1	+ 2
Naturels à base de minerais de fer ou de ferromanganèse	ocre, rouge brun, noir	1,1	+ 2

(1) Valeur moyenne, variable selon la complexité du moule de fabrication, du nombre de pièces identiques réalisés et du type de granulat utilisé.

■ Aspect de surface

Les indices de coûts comparatifs de production des aspects de surface pour une **même constitution de béton** sont donnés dans le tableau 10.

Tableau 10 – Incidence des traitements de surface sur le coût

Aspects de surface	Incidence du traitement de surface	Incidence sur le produit fini (%)
Brut (1)	1	0
Lavé, désactivé	1,05 à 1,15	+ 5
Gommé, sablé	1,05 à 1,15	+ 10
Grésé	1,20 à 1,70	+ 10
Poli mat	1,30 à 1,90	+ 15
Poli brillant	1,40 à 2	+ 20

(1) Les granulats employés pour les **bétons bruts** sont, en général, différents de ceux utilisés avec des bétons traités, polis en particulier. Pour les surfaces brutes de démoulage, il est toujours intéressant et conseillé d'effectuer sur les parties apparentes un traitement de gommage dans le but d'améliorer l'homogénéité d'aspect et la tenue dans le temps du parement (entretien réduit).

5. Mise en œuvre du béton architectonique

5.1 Généralités

Le béton architectonique peut être directement coulé sur le chantier (figure 19), avec la contrainte de réaliser sur place les parements et finitions souhaités.

Pour faciliter la mise en œuvre, ou pour réaliser des finitions particulières, il est souvent judicieux ou nécessaire d'employer des éléments préfabriqués en usine, livrés finis sur le chantier. Ils pourront assurer une fonction porteuse ou non (figures 21 et 24). Cette dernière solution est très employée aujourd'hui pour la facilité de mise en œuvre qu'elle procure du fait d'un montage séquentiel des éléments après réalisation de la structure porteuse. Elle permet également d'éviter la salissure des parements sur chantier.

5.2 Béton architectonique porteur coulé en place

Cette méthode de mise en œuvre (figure 19) utilise des coffrages disposés à l'avancement du chantier et permet de réaliser des ouvrages monolithiques de très grandes dimensions reprenant en général de fortes charges.

■ Principales particularités de la méthode

Elle permet d'obtenir différentes finitions, dont les plus courantes sont des parements bruts de décoffrage (figure 20), désactivés, bouchardés. Certains parements sont plus difficiles à réaliser sur chantier, notamment le polissage, où la préfabrication s'impose économiquement.

La mise en œuvre correcte nécessite une étude de calepinage pour définir les arrêts de coulage, la position des trous de banches, le ferrailage.

Le **coulage du béton** verticalement sur de grandes hauteurs ainsi que les difficultés de réglage de la vibration peuvent engendrer des disparités importantes au niveau du parement (ségrégation, continuité des teintes).

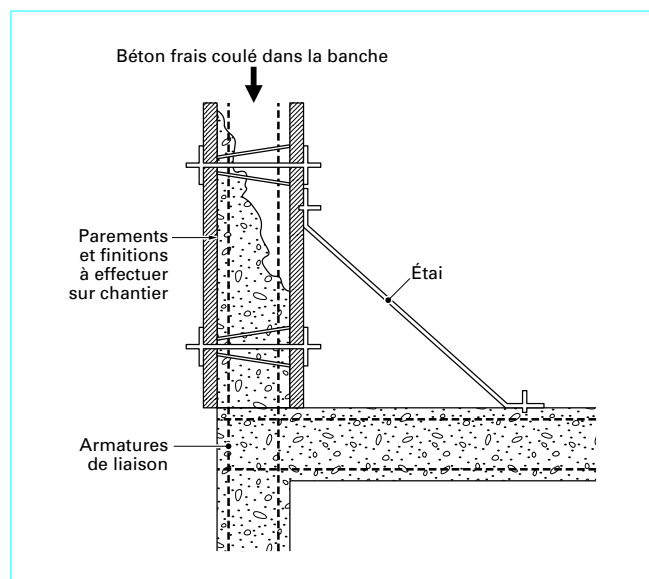


Figure 19 – Béton coulé en place sur chantier



Figure 20 – Béton blanc, brut de décoffrage, retenu pour la réalisation de cet édifice, permettant d'obtenir des parements de qualité lorsque la technique de coulage est bien maîtrisée. Maison de la musique, Nanterre [D. Kahane]

L'**organisation complexe de chantier** doit être parfaitement planifiée et prendre en compte l'approvisionnement en matériaux (armatures, béton...), les délais de réalisation, les conditions climatiques rencontrées qui peuvent conduire à des difficultés de maîtrise des parements, surtout en période de coulage peu favorable (gel, pluie, grande chaleur s'accompagnant souvent de phénomènes de déshydratation). Elle nécessite une étude approfondie des outils de coffrage : résistance, dimensions, implantation du ferrailage et des trous de banche.

La **conduite des travaux** doit être menée en toute sécurité pour le personnel. Elle nécessite à chaque nouveau chantier une recherche de personnel qualifié (chef de chantier expérimenté, personnel d'exécution à former la plupart du temps). Un PAQ (plan d'assurance de la qualité) doit être mis en place avec notamment un suivi d'exécution et un contrôle de la bonne réalisation (spécifications techniques, parements).

■ Contraintes supplémentaires

Le choix de la technique du béton architectonique coulé en place implique :

- une obligation de résultat sur l'ouvrage coulé en place (pas de droit à l'erreur) ;
- une maîtrise plus difficile du résultat compte tenu des contraintes propres au chantier, climatiques en particulier, qui empêchent parfois de pouvoir garantir un parement homogène ;
- un avancement du chantier tributaire des moyens mis en place par l'entreprise (nombre d'outils coffrants disponibles).

5.3 Béton architectural porteur préfabriqué

La méthode de construction à l'aide d'éléments préfabriqués (figure 21) conduit obligatoirement à prévoir une phase de calepinage pour définir les caractéristiques géométriques et les assemblages de chaque élément à réaliser.

La préfabrication permet d'envisager tout type de parement : brut de décoffrage, sablé ou désactivé, grenailé, bouchardé, poli mat ou brillant, flammé, éclaté ou fendu. Un exemple de réalisation est présenté en figure 22.

■ Cette méthode **nécessite** :

- une préparation en amont du chantier pour définir précisément les éléments architecturaux et choisir les assemblages et les joints répondant aux spécifications du projet ;
- une étude du transport des éléments sur le chantier ;
- la livraison impérative des éléments à des dates précises, en fonction du planning d'avancement du chantier, avec la possibilité de remplacer un élément non conforme dans un délai acceptable.

■ Elle **permet** :

- d'obtenir une maîtrise de la qualité de fabrication, réalisée en site industriel, par des équipes spécialisées connaissant parfaitement leurs outils de production ;
- de gérer plus facilement les contraintes climatiques ;
- d'offrir et de choisir une grande variété de parements à partir d'échantillons prédéfinis ;
- de proposer des prototypes permettant de visualiser l'aspect final ;
- de réaliser des composants de forme et de finition complexes ;
- d'introduire un droit à l'erreur dans le cycle de production ;
- d'adapter, dans une certaine limite, la cadence de livraison des produits au planning d'avancement du chantier (meilleure gestion des délais de réalisation) ;
- de construire plus rapidement, à un rythme préétabli ;
- de réceptionner les éléments en usine ;
- de contrôler la qualité des éléments à la réception sur chantier.

■ Elle **implique** : une réalisation rigoureuse des assemblages et des joints, ce qui nécessite un personnel qualifié.

5.4 Béton architectural non porteur préfabriqué

L'industrie du béton développe depuis plusieurs années une nouvelle génération de produits non porteurs préfabriqués (éléments autoporteurs, portés ou suspendus) permettant de gérer le chantier de manière séquentielle (figure 23).

L'approche séquentielle apporte effectivement plus de souplesse vis-à-vis de la réalisation des travaux :

- l'entreprise et l'industriel s'accordent sur le planning de réalisation et peuvent ensuite conduire leurs travaux de manière indépendante ;
- les éléments architecturaux sont mis en place en fin de chantier, après réalisation de la structure, ce qui permet, d'une part, de limiter

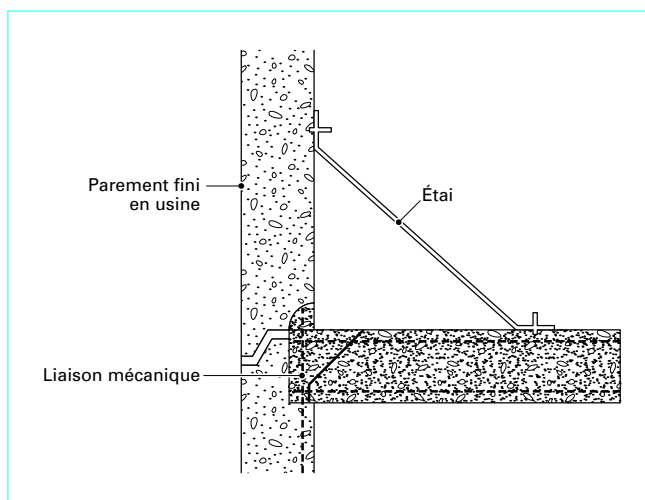


Figure 21 – Élément porteur préfabriqué en usine, disposé à l'avancement du chantier (pose traditionnelle)



Figure 22 – Modénatures de façade associant éléments en béton (acrotères, bandeaux) et pièces d'ornement réalisées en bois, fonte d'aluminium et pierre. Place Chalon, Paris [S. Fiszler]

les risques de salissures des parements et, d'autre part, d'aller très vite en mise en œuvre ;

- les joints ont un rôle moindre vis-à-vis de l'étanchéité (meilleure répartition des barrières d'étanchéité entre éléments préfabriqués et coulés en place).

Les bétons architectoniques non porteurs ainsi réalisés offrent les mêmes caractéristiques techniques de fabrication que les éléments porteurs préfabriqués.

On les utilise beaucoup aujourd'hui pour réaliser des éléments de parement de grande dimension fixés mécaniquement à la structure et utilisés aussi bien en façade qu'en revêtements décoratifs intérieurs de bâtiments (figure 23).

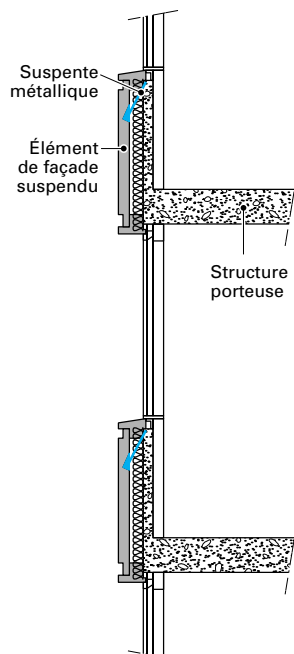


Figure 23 – Béton architectural non porteur permettant d'exploiter la multiplicité des états de surfaces offerts en préfabrication.

Air France Roissy [D. Vallode, J. Pistre, Ph. Matsakis]

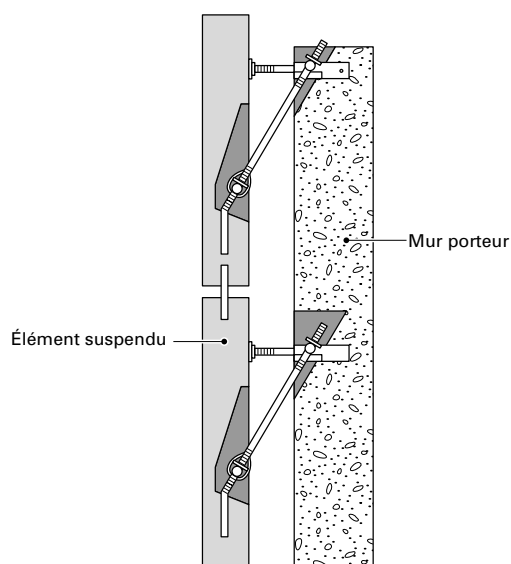


Figure 24 – Liaison par suspentes : coupe verticale

Ils sont particulièrement compétitifs pour réaliser des systèmes d'isolation par l'extérieur d'un grand confort thermique. Dans ce type d'utilisation, il est possible de les associer à des systèmes de murs rideaux ou manteaux utilisant une ossature secondaire. Le principe de liaison employé pour ces éléments est présenté figure 24.



Figure 25 – Éléments préfabriqués en béton blanc poli utilisés pour le coffrage de piles de viaduc. Viaduc de Chavanon

[J. V. Berlotier]

D'autres produits non porteurs préfabriqués sont également utilisés pour réaliser des éléments de coffrage. Ils permettent d'associer un béton de structure coulé en place et un béton de parement préfabriqué (figure 25). Cette solution est en général d'un coût très compétitif.

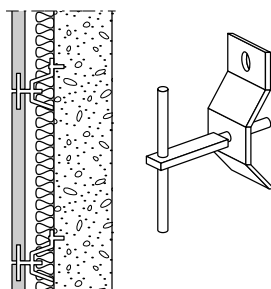


Figure 26 – Agrafes de fixation utilisées avec les plaques de parement de façade. Logements. Paris

[Gérard Thurnauer, Antoine Aygaline]

Citons, enfin, l'emploi de plaques de parement utilisées pour l'habillage de façades ou de murs intérieurs. Ces éléments sont fixés mécaniquement à la structure à l'aide d'agrafes (figure 26). La résistance contrôlée du béton permet d'offrir un montage d'une grande durabilité.

5.5 Quelle méthode de mise en œuvre choisir ?

Le choix se fera en fonction de critères tels que :

- caractéristiques techniques et performances de l'ouvrage à réaliser ;
- complexité et qualité de réalisation des aspects de surface ;
- délais ;
- enveloppe budgétaire ;
- coûts de réalisation ;
- qualité architecturale des aspects de surface.

Une étude comparative est, de ce fait, nécessaire pour valider les choix technico-économiques les plus performants, compte tenu des contraintes et du résultat recherché.

Dans bien des cas, la préfabrication se montrera adaptée et compétitive. Elle permet, en effet, de réaliser des ouvrages avec une meilleure maîtrise de la qualité des parements tout en respectant les coûts et le délai de réalisation.

6. Contrôle des aspects de surface

6.1 Échantillons témoins

Compte tenu de la grande variété possible des aspects de surface, ceux-ci sont définis à partir d'échantillons témoins d'au moins 20 × 30 cm, réalisés par le préfabricant ou l'entreprise.

Un procès-verbal d'acceptation sera signé entre les différentes parties (architecte, entreprise et industriel) pour valider les choix retenus.

6.2 Qualité de la texture

Le niveau de qualité est évalué en référence à l'échelle de bullage définie dans la norme P 18-503. On peut se reporter également au Cahier des charges des éléments architecturaux en béton fabriqués en usine, FIB.

6.3 Écarts de teinte

La vérification des teintes est réalisée à partir de l'échelle des gris de la norme P 18-503.

L'écart de teinte admissible (± 1 degré à ± 2 degrés de l'échelle) est défini avec le maître d'œuvre à l'occasion de la réalisation des échantillons témoins.

La vérification de la teinte peut se faire selon la procédure du Cahier des charges des éléments architecturaux en béton fabriqués en usine, FIB et, en particulier, à l'aide de l'outil de visualisation diffusé par le CERIB.

7. Durabilité

■ Les **critères de durabilité** pour un béton architectural sont les suivants.

● **Enrobage des armatures** : enrobage minimal de 25 mm pour toute surface extérieure ou exposée aux intempéries et enrobage minimal de 20 mm pour toute autre partie.

Un enrobage supplémentaire de 10 mm est à prévoir pour les surfaces exposées aux environnements agressifs.

Pour les parements de gravillon lavé ou désactivé, l'enrobage se mesure dans les creux, au niveau de la partie la plus profonde.

● **Résistance mécanique** : le béton constitutif doit présenter une résistance caractéristique minimale de 30 MPa à 28 jours.

● **Absorption d'eau par remontée capillaire** : le coefficient d'absorption d'eau par remontée capillaire doit présenter, à 28 jours, pour les bétons de masse de granulats courants et de parement, une valeur au plus égale à 3, aucun résultat individuel n'excédant 3,5.

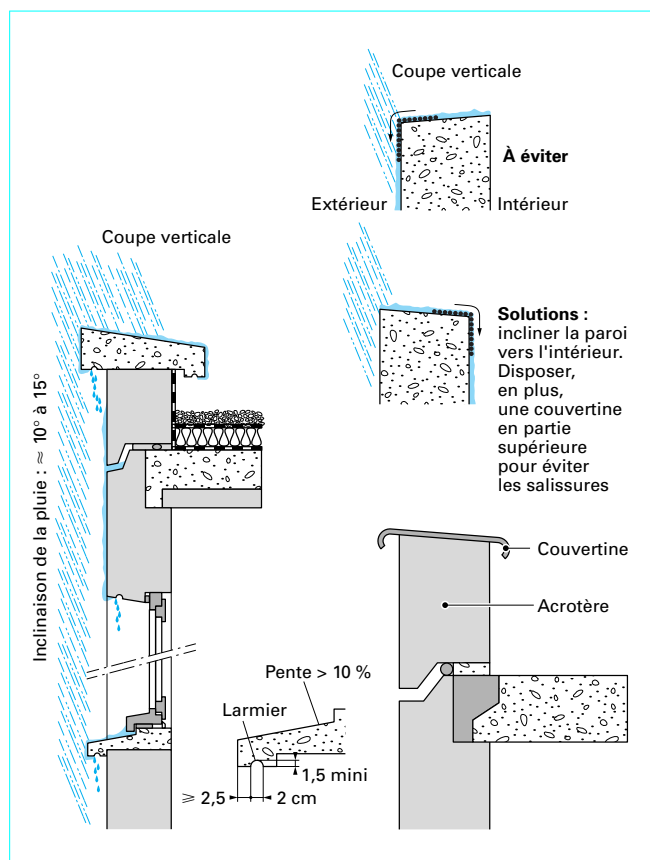


Figure 27 – Principaux dispositifs de rejet d'eau

● **Plasticité** : sauf utilisation d'adjuvants, la plasticité du béton frais doit être telle que son affaissement au cône d'Abrams, mesuré selon la norme NF P18-451, soit inférieur ou égal à 10 cm.

● **Résistance au gel-dégel** : lorsque les éléments sont destinés à être mis en œuvre dans un environnement climatique agressif (emploi intensif de sels de déverglaçage par exemple), l'essai d'absorption d'eau par remontée capillaire peut être complété par un essai de gel-dégel plus approprié aux conditions d'exposition rencontrées (tableau 11).

Tableau 11 – Normes d'essais au gel	
Classe d'exposition	Norme relative à l'essai proposé
Gel faible maximum 2 jours/an avec température maximale < - 5 °C	P 18-425
Gel sévère plus de 10 jours/an avec température maximale < - 10 °C	P 18-424
Gel et sels de déverglaçage	XPP 18-420

● **Autres cas d'environnement agressif** : pour ceux-ci (produits chimiques, locaux agricoles...), la conformité à des essais spécifiques complémentaires peut être prescrite.

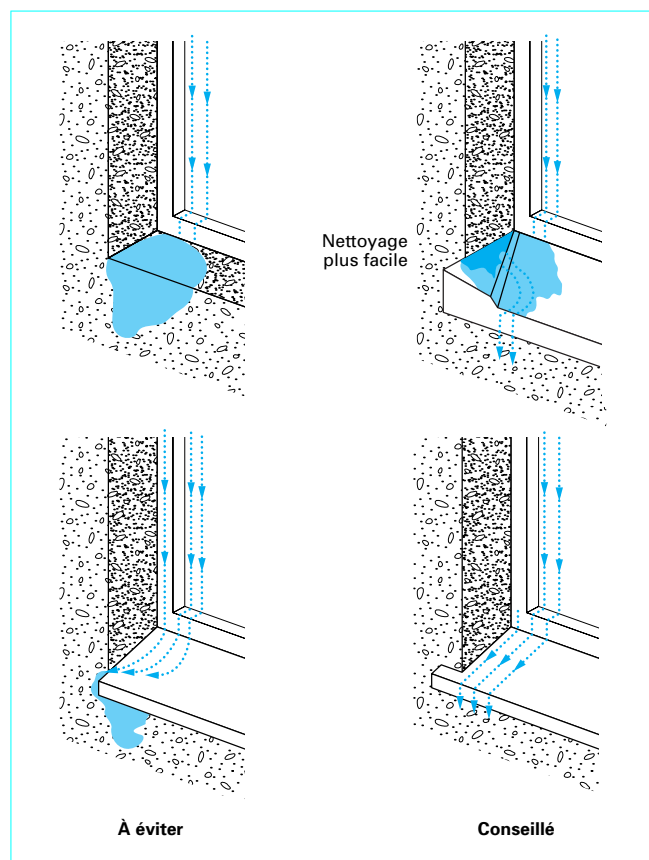


Figure 28 – Dispositions pour appuis de fenêtre

■ La durabilité d'une surface est également fonction de sa finition. La **durabilité des traitements de surface** peut se classer de manière décroissante comme suit :

- polissage ;
- lavage ;
- sablage ;
- brut de démoulage ;
- bouchardage.

Quel que soit le mode de finition adopté, il est recommandé de recourir dans la mesure du possible à l'emploi de solutions préventives visant à protéger le parement. On peut utiliser en particulier des **dispositifs de rejet d'eau** (figure 27) tels que :

- acrotères munis d'une couvertine débordante ;
- corniches saillantes disposées en partie supérieure de l'édifice (cette partie pouvant être associée à l'acrotère) ;
- appuis de baie débordants (figure 28) ;
- bandeaux ou moulures saillantes (figures 29 et 30) ;
- balcons qui écartent fortement la pluie de la façade ;
- enfin tout système efficace pour éloigner l'eau de la façade.

Il convient d'incorporer en face horizontale inférieure de ces dispositifs un larmier, qui vient couper la continuité de ruissellement de l'eau.

Par ailleurs, il y a lieu d'éviter les formes propices à la stagnation de l'eau, favorables au développement de mousses, telles que les saillies horizontales en pente insuffisante ou en contre-pente (figure 29).

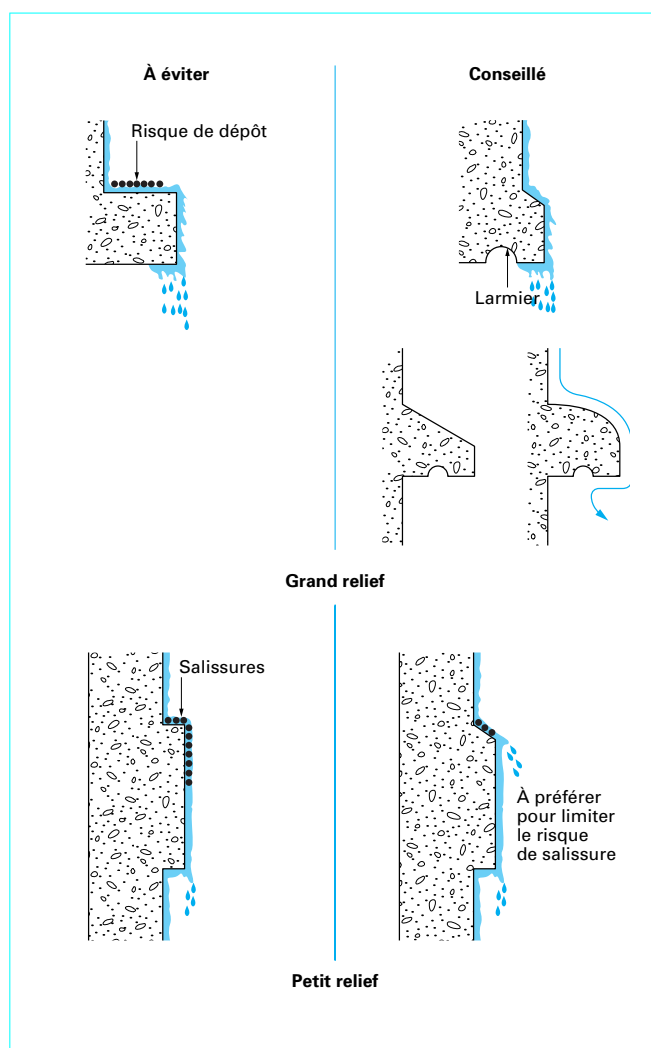


Figure 29 – Forme des modénatures

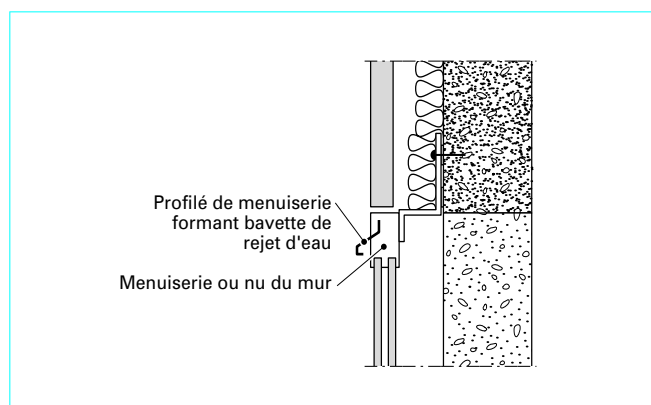


Figure 30 – Montage en mur rideau

8. Entretien

8.1 Origine et nature des altérations

Les principales altérations rencontrées en parement peuvent être d'origine interne au béton (efflorescences par exemple), environnementales ou humaines.

Une enquête menée par le CERIB montre que les agressions les plus fréquemment signalées sont par ordre décroissant :

- les graffitis (28 %) ;
- les dégradations dues à des taches diverses (20 %) ;
- les mousses et champignons (20 %) ;
- les poussières (15 %) ;
- les fumées et suies (8 %) ;
- les pluies acides (8 %).

La majeure partie de ces altérations peut être traitée de manière préventive (application d'un hydrofuge par exemple) ou curative.

8.2 Traitement des salissures et des altérations des parements

De nombreux produits de coloriage sont utilisés en **graffitis** : encres traditionnelles, encres indélébiles, peintures en bombe aérosol, peintures à l'huile, craies, cirages, goudrons...

Compte tenu de la diversité de ces produits, les **antigraffitis** mis en œuvre ne peuvent être universellement efficaces.

Le choix d'un antigraffiti (tableau 12) va dépendre principalement :

- de la texture de la surface à protéger ;
- de la fréquence de réalisation des graffitis ;
- des risques de modification de teinte.

Tableau 12 – Traitements antigraffitis		
Famille de produit	Mode d'action	Type
Polyuréthane	Filmogène (1) Nettoyage facile	Permanent : 60 nettoyages en moyenne
Résine silicone	Bouche-pores (2) (moins employé aujourd'hui)	Temporaire
Émulsion acrylique	Oléophobe (3)	Temporaire
Microcire	Filmogène et bouche-pores	Temporaire

(1) Forme une pellicule en surface qui s'oppose à la migration des colorants.
 (2) Colmate la porosité superficielle et empêche la pénétration des agents tachants.
 (3) Modifie la tension superficielle du matériau rendant impossible la pénétration des agents tachants.

D'une manière générale et quel que soit le produit de protection utilisé, les graffitis doivent être éliminés le plus rapidement possible (dans les 24 h), afin d'éviter la migration des pigments dans la protection, voire dans le béton.

■ Actions préventives

Appliquer un antigraffiti permanent ou temporaire ; la protection est dite temporaire lorsqu'elle s'élimine avec les graffitis lors du nettoyage.

L'emploi d'antigraffitis facilite l'entretien des supports à l'aide de méthodes de nettoyage simples et non agressives. La mise en œuvre d'un produit préventif est fortement conseillée sur les éléments architecturaux.

Coût approximatif du traitement (coût 2000) : 70 à 90 F/m².

■ Actions curatives

Nettoyer les surfaces dégradées en appliquant l'une des solutions du tableau 13 selon l'état de surface initial.

Tableau 13 – Nettoyage des graffitis selon l'aspect de surface du béton	
Aspect de surface	Actions curatives (1)
Brut de démoulage	B D F G (2)
Lavé, désactivé	B D F
Sablé, grenailé	B D F
Bouchardé	B D F
Poli	B F G (2)
Hydrofugé (3)	B F
Traité antigraffiti (3)	B F
(1) B Lavage à l'eau sous pression F Nettoyage chimique (voir taches diverses) (2) Méthode à utiliser si les autres ne sont pas satisfaisantes. (3) Méthodes à choisir selon recommandations du formulateur.	
D Sablage humide G Brossage et ponçage	

8.3 Taches diverses

■ Actions préventives

Emploi de produits filmogènes tels que les polyuréthanes (cf. tableau 12, traitement antigraffitis).

■ Actions curatives

Le tableau 14 donne les principaux traitements.

■ Techniques de nettoyage des taches

Il s'agit des opérations suivantes :

- identifier en premier lieu la nature de la tache ;
- procéder ensuite à un essai de nettoyage avec le produit adapté ;
- nettoyer le support selon l'une des méthodes du tableau 14 ;
- traiter par petites surfaces, en utilisant un minimum de produits.

Lors de l'emploi de produits attaquant le béton, la mise en contact ne doit pas excéder une minute. Rincer abondamment à l'eau dans la minute qui suit l'application ou le brossage.

Dans le cas d'utilisation de solvants, les rejets dans le milieu naturel sont à proscrire et doivent être récupérés.

L'efficacité des méthodes et des produits de détachage est liée à l'âge de la tache, mais aussi à la texture de la surface tachée (tableau 15).

8.4 Salissures d'origine bio-organique

■ Le développement de ces **micro-organismes** (par exemple : mousses, lichens) est conditionné par la présence d'eau et de végétation à proximité de la surface, par la température et la luminosité du support.

Ces salissures donnent à la surface un aspect noir, rouge ou vert. Elles se développent localement et forment des surfaces circulaires ou coniques à l'endroit d'un passage d'eau par exemple.

■ Actions préventives

Emploi d'un hydrofuge de surface (tableau 16), fongicide éventuellement, ou d'un minéralisateur (tableau 17).

■ Actions curatives

Lavage à l'eau sous pression ou lavage à la vapeur.

Lavage à l'eau de Javel diluée à 5 % environ.

Utiliser, si nécessaire, un biocide (fongicide ou antimousse, tableau 18).

Appliquer, éventuellement, après nettoyage un hydrofuge de surface (tableau 16).

8.5 Salissures liées à l'environnement

Les **poussières** ou les **salissures dues aux gaz polluants** forment de grandes zones sombres sur la surface (aspect sale). Elles sont constituées de microparticules solides ou liquides fixées sur la surface du béton. Ces particules peuvent être des cendres, du carbone amorphe, de l'oxyde de fer ou des sous-produits de combustion plus ou moins gras (fumées et suies).

Les particules dues aux **pluies acides** peuvent provoquer un lessivage du parement accompagné d'une augmentation de la porosité et peuvent aussi se traduire par une baisse de la résistance mécanique.

Le tableau 19 donne les traitements pour les salissures liées à l'environnement et le tableau 20 présente les méthodes à choisir selon la texture de surface.

8.6 Fissures et écaillage dus aux cycles de gel-dégel

Ces risques de dégradation peuvent apparaître en situation de gel sévère (montagne notamment) avec ou sans présence de sels de déverglaçage.

■ Actions préventives

Employer une formulation spéciale de béton : granulats de parement peu gélifs.

Employer dans certains cas un adjuvant entraîneur d'air adapté à la situation de risque (cf. *Cahier des charges des éléments architecturaux en béton fabriqués en usine*).

■ Actions curatives

Appliquer, après élimination de la partie friable du béton, un produit normalisé de réparation de surface compatible avec la finition recherchée.

8.7 Efflorescences

Ce phénomène naturel est dû à la remontée d'eau chargée en calcium à la surface du béton, formant des cristaux blanchâtres de carbonate de calcium.

■ Actions préventives

Réduire la quantité d'eau de gâchage et optimiser la compacité du béton.

Respecter les conditions de cure et de stockage des éléments préfabriqués.

Employer un hydrofuge de masse ou de surface.

Tableau 14 – Recommandations pour traiter les taches ou salissures sur le béton

Nature des taches	Action préalable	Produits à utiliser (2)	Traitement (1)
Asphalte et bitume	Abrasion	Benzol (*, ●) ou lessive chaude (▲)	C S B R
Café, thé, boisson gazeuse	Absorption	Trichloréthane (●)	C S B R
Chewing-gum	Refroidissement, grattage	Chloroforme, tétrachlorure de carbone (●)	A S B R ou C S B R
Chocolat	Humidification	Alcool ammoniacal	A R
Crayon	Gommage	Méthanol (●)	C S B R
Créosote	Abrasion	Benzol (*, ●)	C S B R
Encre	Humidification	Mélange de : — 100 g borate de sodium ou ammoniacque ou eau de Javel — 400 g d'eau — 500 g de talc	C S B R
Fruit	Humidification	Détergent	A B R
Goudron de bois, de fumée	Abrasion	Benzol (*, ●)	C S B R
Graffiti	Lavage ou gommage	Chlorure de méthylène (●), xylène (●), méthyléthylcétone (●)	A S B R
Graisse	Grattage	Eau savonneuse + phosphate trisodique	A R ou C S B R
Huiles minérales ou de synthèse	Absorption	Benzol (*, ●) ou trichloréthylène (●) ou lessive chaude (▲)	C S B R
Huile végétale	Absorption	Mélange de : — 100 g phosphate trisodique — 100 g perborate de sodium — 300 g talc + savon liquide	C S B R
Micro-organisme (traces de)	Humidification	Eau de Javel 5 %	A R ou A B R
Oxyde de cuivre	Humidification	Mélange (▲, ●) de : — 150 g ammoniacque — 100 g chlore — 400 g talc	C S B R
Peinture	Absorption	Agent détachant particulier selon type de peinture	
Rouille	Humidification	Acide oxalique 5 % (●, ○) ou acide phosphorique 10 % (○ ▲)	A B R ou C S B R
Sang	Lavage à l'eau	Potasse caustique ou eau oxygénée (▲)	A B R
Sels d'aluminium	Humidification	Acide chlorhydrique 10 % (○ ▲)	A B R
Tabac	Abrasion	Eau pure ou méthanol (●)	A
Tannin	Humidification	Eau oxygénée 20 volumes	A R ou C S R
Tomate, vin	Humidification	Bisulfite de sodium 25 %	A B R
Urine	Lavage à l'eau	Détergent	A B R

(1) A : application B : brossage C : cataplasme R : rinçage S : séchage

(2) **Précautions d'emploi :**

* Produit inflammable : à manipuler loin de toute source de chaleur

● Produit toxique : porter des gants et éviter d'inhalier les vapeurs

▲ Produit corrosif : protéger la peau et les yeux et éviter les projections

○ Produit attaquant le béton

Tableau 15 – Traitement des taches ou salissures à appliquer selon l'état de surface

Aspect ou traitement de surface	Actions curatives (1)
Brut de démoulage	A B F D (2)
Lavé, désactivé	A B F D (2)
Sablé, grenailé	A B F D (2)
Bouchardé	A B F D (2)
Poli	A B F
Hydrofugé (3)	A B F
Traité antigraffiti (3)	A B F

- (1) A : Lavage à l'eau du réseau B : Lavage à l'eau sous pression
D : Sablage humide F : Nettoyage chimique.
(2) Méthode à utiliser si les autres ne sont pas satisfaisantes.
(3) Méthodes à choisir selon les recommandations du formulateur.

Tableau 16 – Hydrofuges de surface

Famille de produit	Durabilité estimée	Caractéristiques	Application
Silane	Bonne, > 10 ans	Importante profondeur de pénétration, mais relativement volatile	Sur support sec ou support humide
Oligomère de siloxane	Bonne, > 10 ans	Très bon pouvoir de pénétration Efficace après 4 à 5 h	Sur surface encore un peu humide
Résine silicone	Bonne	Faible profondeur de pénétration Effet perlant important	Sur support sec
Siliconate	Moyenne	Polymérisation en présence de CO ₂ (moins employé aujourd'hui)	Application difficile
Résine acrylique	Bonne, > 10 ans	Semi-filmogène Frein à la pénétration du CO ₂ , SO ₂ , SO ₃ Résiste aux UV Peut être colorée Bonne résistance à l'eau Également antigraffiti.	Sur support humide
Résine organo-métallique	Moyenne	Bon pouvoir de pénétration	Sur support sec
Résine fluorée	Bonne	Profondeur de pénétration faible Action antigraffiti et fongicide suivant formule	Sur support sec
Coût approximatif de traitement : 40 à 60 F/m² (coût 2000).			

Tableau 17 – Minéralisateurs

Les minéralisateurs sont des solutions à base de silicates (d'éthyle, de potassium...) qui agissent par imprégnation. Ce traitement, par apport de silicate, a également la propriété de durcir le matériau sur l'épaisseur imprégnée.

Il faut toutefois prendre garde au risque de modification de teinte pouvant éventuellement apparaître avec certains minéralisateurs. Cette protection a un caractère **définitif**.

Coût approximatif de traitement : 5 à 10 F/m² (coût 2000).

Tableau 18 – Fongicides et antimoisses

Les fongicides et les antimoisses permettent d'éliminer les salissures d'origine biologique : mousses, lichens, champignons. Leur action, bien qu'efficace, reste **temporaire**.

Les plus courants sont à base de sels d'ammonium ou de cuivre. Ce traitement pouvant toutefois entraîner la coloration du support, il est prudent d'effectuer un test préalable sur un échantillon ou une partie cachée de l'élément à nettoyer.

De plus en plus, les biocides actuels sont associés à une protection hydrofuge qui empêche toute pénétration de l'eau dans les parements.

Coût approximatif de traitement : 30 à 40 F/m² (coût 2000).

Tableau 19 – Traitement des salissures liées à l'environnement

Poussières, gaz polluants	Pluies acides
Actions préventives	
Emploi d'un hydrofuge de surface de type résine acrylique venant boucher partiellement les pores du matériau.	Emploi d'une résine polyuréthane ou acrylique venant boucher partiellement les pores du matériau.
Actions curatives	
Nettoyage selon l'aspect de surface initial du béton (tableau 20).	Nettoyage selon l'aspect de surface initial du béton (tableau 20). Appliquer ensuite un produit de protection filmogène (résine acrylique, polyuréthane par exemple).

Tableau 20 – Nettoyage des salissures dues à l'environnement selon la texture de la surface du béton

Aspect ou traitement de surface	Actions curatives (1)
Brut de démoulage	A B C D D' E G (2)
Lavé, désactivé	A B C D D' E
Sablé, grenailé	A B C D D' E
Bouchardé	A B C D D' E
Poli	A B C E (2) G
Hydrofugé (3)	A B E (2)
Traité antigraffiti (3)	A B E (2) F
(1) A : Lavage à l'eau du réseau B : Lavage à l'eau sous pression C : Lavage à la vapeur D : Sablage humide D' : Sablage à sec E : Gommage (microbilles de verre) F : Nettoyage chimique G : Brossage et ponçage. (2) Méthode à utiliser si les autres ne sont pas satisfaisantes. (3) Méthode à choisir selon les recommandations du formulateur.	

■ Actions curatives

Saturer d'eau le support et appliquer, à l'aide d'une brosse en nylon, l'agent de nettoyage [solution d'acide chlorhydrique ou d'acide sulfamique (5 à 10 %)].

Rincer abondamment dans la minute suivante.

En cas de récurrence, terminer le nettoyage par l'emploi d'un hydrofuge de surface.

8.8 Corrosion des armatures

Si l'enrobage est insuffisant, les armatures peuvent se corroder lorsque le béton est exposé aux intempéries ou à des condensations. Cette corrosion produit un gonflement des armatures qui peut aller jusqu'à l'éclatement du béton d'enrobage.

Un béton trop poreux, un enrobage des armatures insuffisant, la présence de fissures, favorisent le développement de la corrosion.

Un excès de chlorure d'origine naturelle (embruns marins, eau de mer, sels de déverglaçage, effluents) ou provenant des constituants du béton conduit à un gonflement (par fixation d'eau) et peut également favoriser la corrosion des armatures.

■ Actions préventives

Prévoir un béton bien compacté et un enrobage adapté aux conditions d'utilisation : 25 mm minimum en façade, voir *Cahier des charges des éléments architecturaux en béton fabriqués en usine*, édité par le FIB, et Règles BAEL (DTU P 18-702).

Pour le béton précontraint ou les éléments contenant des suspentes en acier inoxydable, ne pas utiliser d'adjuvant contenant des chlorures. Pour les autres utilisations limiter à 0,65 % du poids du ciment la quantité d'ions chlore (voir *Cahier des charges des éléments architecturaux en béton fabriqués en usine* et norme P 18-203-DTU 21.4).

■ Actions curatives

Éliminer les éclats de béton et les parties douteuses.

Éliminer la corrosion à l'aide d'un procédé mécanique (brossage, meulage, sablage).

Protéger les armatures (coulis de protection contenant des inhibiteurs de corrosion).

Ragréer la partie endommagée à l'aide d'un béton chargé en résine si possible.

Effectuer les finitions appropriées.

8.9 Modifications de la teinte des parements colorés

Dans le cas d'une surface de béton brute, la peau riche en éléments fins (ciment, fines, colorants) se trouve progressivement érodée par

le ruissellement de l'eau de pluie au cours du temps. Il en résulte un aspect de surface légèrement délavé. Ce phénomène est généralement moins marqué sur les parois de béton traité (lavage, sablage, polissage, etc.).

Certains pigments, et particulièrement les pigments organiques, sont susceptibles de vieillir rapidement sous l'effet combiné de la chaleur, de l'humidité et des rayons solaires. Ils sont donc à proscrire et à remplacer par des pigments d'origine minérale, d'une grande stabilité.

■ Actions préventives

N'utiliser que des colorants d'origine minérale (§ 2.4.2).

■ Actions curatives

Utiliser des traitements de surface qui ravivent les teintes (par exemple protection de surface à base de polyuréthane).

8.10 Faïençage des surfaces brutes de démoulage

Ce phénomène naturel se manifeste par un réseau de fissures fines, parfois à peine visibles, qui n'intéresse que la couche superficielle de laitance du béton brut.

Le faïençage est inesthétique mais ne réduit pas la durabilité des éléments.

■ Actions préventives

Respecter les conditions de cure du béton.

Utiliser un minéralisateur qui renforce la résistance en surface.

Appliquer un traitement de type gommage, qui modifie très peu l'aspect brut, si celui-ci est souhaité.

■ Actions curatives

Appliquer un traitement de type gommage ou un léger sablage.

Appliquer ensuite un minéralisateur (tableau 17) ou un hydrofuge de surface (tableau 16).

Crédit photographique : H. Abbadie, N. Borel, H. Chapon, A. Goustard, l'Image contemporaine, Y. Lainville, J.-R. Landecy, O. Martin-Gambier, G. Maucuit-Lecomte, M. Moch, J.-M. Monthiers, P. Muller, M. Plemet, M. Robinson, Tricycle, O. Wogenscky, X... droits réservés.