

LE BÉTON COLORÉ

TECHNOLOGIE | DÉCEMBRE 2016



- LUMIÈRE - COULEURS - PIGMENTS
- FACTEURS D'INFLUENCE
- VIEILLISSEMENT
- COLORIMÉTRIE





's Hertogenmolens, Aarschot (noAarchitecten)

Auteurs de projet, architectes, maîtres d'ouvrage, tous le savent : la couleur du béton ne doit pas toujours se cantonner au gris. Jouer avec la couleur et la texture de la surface permet de valoriser un produit ou un ouvrage en béton, non seulement du point de vue de ses propriétés fonctionnelles, mais aussi de son aspect décoratif. Si colorer du béton frais par l'addition de pigments est une technique simple, le procédé soulève de très nombreuses questions sur la manière d'obtenir telle ou telle teinte ou couleur. En effet, d'autres paramètres influencent l'aspect final du béton. Parmi eux, citons le facteur eau-ciment du béton, les types de sable et de ciment utilisés, ainsi que le processus de malaxage. Une autre source de préoccupation concerne l'évolution de l'aspect de la surface du béton à travers le temps. Les salissures et le vieillissement jouent un rôle important à cet égard, mais la question la plus récurrente est sans nul doute la suivante : pourquoi les couleurs s'atténuent-elles parfois avec le temps ? Pour y répondre, nous reviendrons sur quelques notions de réflexion et de diffusion de la lumière et sur une analyse microscopique du béton. Cette publication se penche sur ces différents aspects du béton coloré dans la masse et explicite brièvement les possibilités de mesure et d'évaluation colorimétriques.

D'autres aspects extérieurs du béton, tels que les bulles d'air, les nids de gravier ou les variations des teintes de gris ne seront pas abordés ici. À ce propos, nous renvoyons le lecteur à d'autres publications professionnelles sur le béton apparent (prNBN B15-007) et sur le béton architectonique, notamment la PTV 21-601. De même, nous n'évoquerons que brièvement le béton lavé dont l'apparence est déterminée non seulement par l'éventuelle coloration du mortier, mais également par les granulats présents en surface. La publication I-3 de FEBELCEM intitulée « Les revêtements en béton coloré lavé » pourra servir de référence à ce sujet.

TABLE DES MATIÈRES

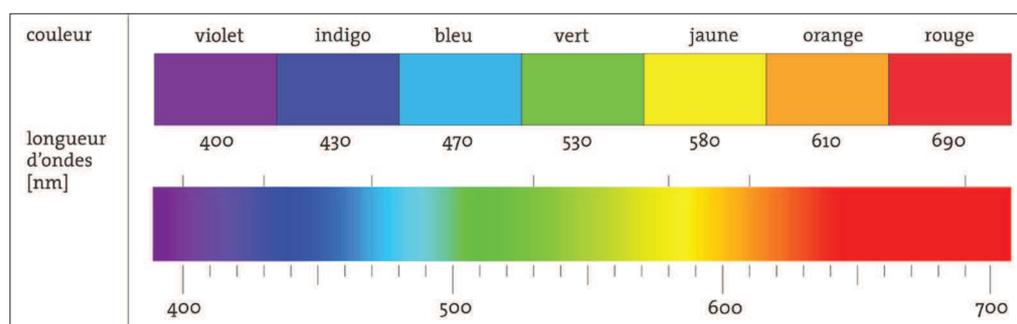
1. Lumière et couleur
2. Pigments
3. Béton coloré : facteurs d'influence
4. Vieillissement du béton coloré
5. Influence du pigment sur la qualité du béton
6. Prescrire et évaluer le béton coloré

1. LUMIÈRE ET COULEUR

La lumière est une onde électromagnétique observable par l'œil humain pour les longueurs d'ondes comprises entre env. 380 nm et 740 nm. Les différentes longueurs d'ondes correspondent à l'éventail de couleurs, allant du rouge pour l'onde la plus longue au violet pour la plus courte. Ce spectre est généralement qualifié de « couleurs de l'arc en ciel ».

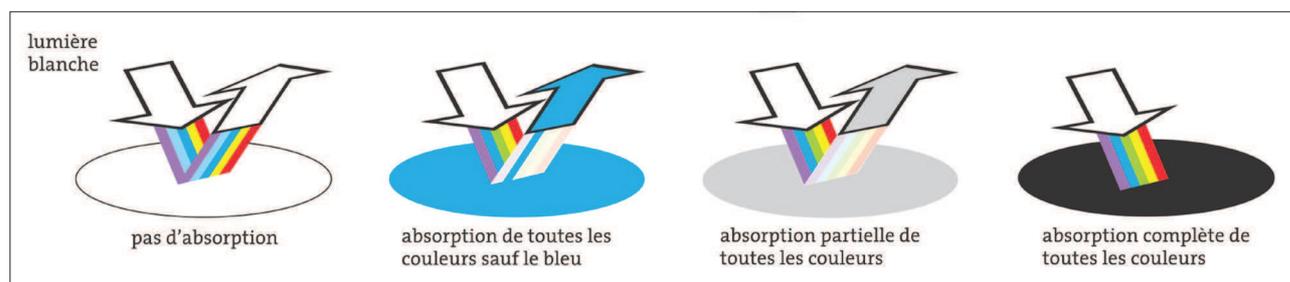
Le spectre chromatique est cependant continu : chaque valeur de longueur d'onde correspond à une couleur.

Il existe par ailleurs d'autres couleurs hors du spectre, obtenues par mélange de deux couleurs (ou longueurs d'ondes). C'est par exemple le cas des teintes roses et violettes, comme le magenta.



Spectre chromatique et longueurs d'ondes

Si nous voyons un objet coloré, c'est grâce à la lumière qui s'y réfléchit. Dans un environnement plus sombre, les couleurs s'atténuent. Une fois l'obscurité complète, elles ne sont plus observables. La couleur d'une surface est déterminée par la longueur d'onde de la lumière qui s'y réfléchit. Une surface absorbant les ondes de tout le spectre - et ne réfléchissant donc pas de lumière - est dite noire. A contrario, si les ondes de tout le spectre sont réfléchies, il s'agit d'un objet blanc.



Par ailleurs, l'observation d'une surface colorée est influencée par le niveau de réflexion de la lumière à cet endroit. Une surface lisse donne lieu à une réflexion optimale et par conséquent à une couleur brillante. Dans le cas d'une surface poreuse, les rayons lumineux sont dispersés et prennent une couleur plus mate et plus pâle. À mesure que la lumière fait l'objet d'une dispersion plus diffuse, la couleur s'éclaircit pour aller même jusqu'au blanc. Illustrons le phénomène par ces quelques exemples familiers : la mousse se formant dans un verre de bière est blanche en raison de la dispersion de la lumière sur la structure poreuse et un tapis de neige doit sa couleur à la diffusion de la lumière dans toutes les directions.

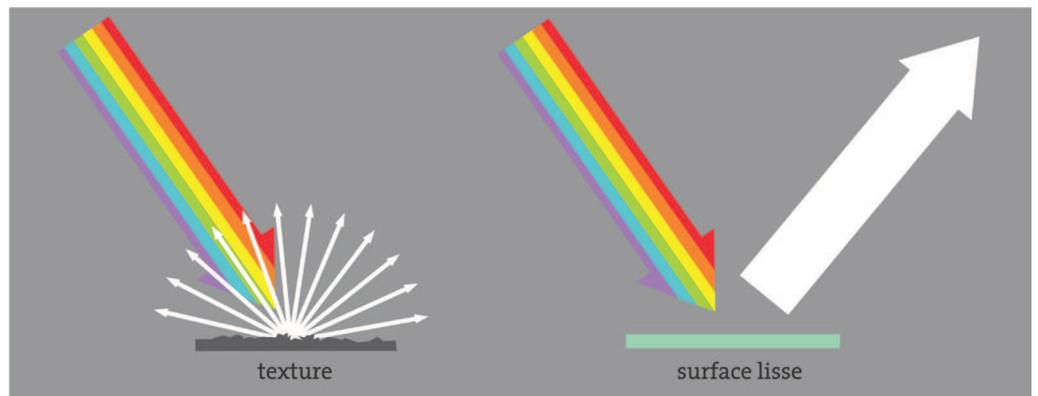
Réflexion et absorption

Dispersion de la lumière



Une surface de béton lisse présentera également une couleur plus brillante qu'une surface à texture plus rugueuse. Les inégalités de la surface ont pour effet de disperser la lumière, l'œil observant dès lors une couleur plus pâle.

Clarté et brillance



Comparaison de deux surfaces colorées d'éprouvettes réalisées avec le même béton. À gauche, une surface lisse et brillante. À droite, la surface a été traitée au moyen d'une solution acide, afin d'obtenir une texture plus rugueuse. La couleur est dès lors plus claire et des taches blanches et noires, provenant des granulats, sont par ailleurs observées.

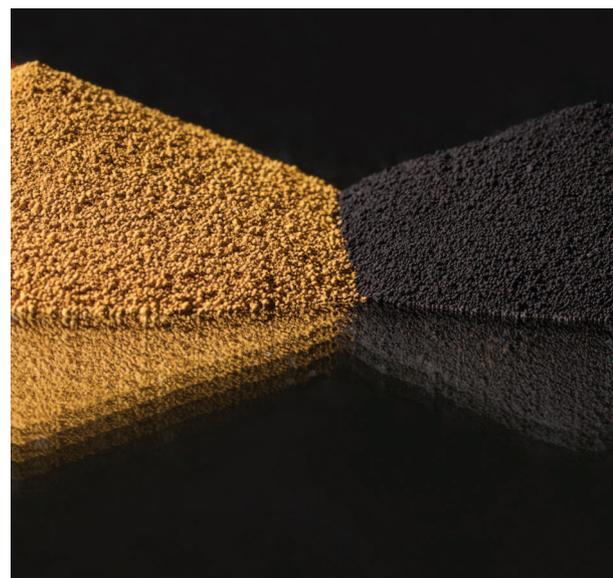
2. PIGMENTS

Les pigments sont constitués de particules très fines, des grains mesurant environ $1/2000$ mm (soit $0,5 \mu\text{m}$ ou 500 nm), soit environ 20 fois plus petits que des particules de ciment. Contrairement au ciment, il s'agit bien ici de particules inertes. En d'autres termes, il n'y a pas ici de réaction hydraulique.

Les propriétés requises sont décrites dans la norme NBN EN 12878:2014 « Pigments de coloration des matériaux de construction à base de ciment et/ou de chaux - Spécifications et méthodes d'essai ». Les pigments destinés à la coloration du béton doivent résister aux alcalis, à la lumière (en particulier aux rayons UV) et au vieillissement. La reproductibilité de l'intensité chromatique doit être établie et la couleur doit rester conforme à un pigment de référence. Par ailleurs, les propriétés des pigments en matière de technologie du béton doivent être telles qu'elles n'influencent le début et la fin du temps de prise que de façon limitée. D'autres exigences sont également applicables en cas de béton armé.

Les colorants se présentent sous différentes formes : en poudre, en grains, en suspension et en sachets solubles.

- La poudre est la forme la plus courante et la moins chère. Sa densité absolue s'établit à environ 5 kg/dm^3 . Elle présente cependant l'inconvénient d'être plus difficile à mélanger et de produire éventuellement de la poussière.
- Les pigments sous forme de grains (« granulats ») sont obtenus par agglomération de poudre au moyen d'un liant, généralement un polymère. Cette forme est appliquée principalement dans le secteur du béton préfabriqué et combinée à l'utilisation d'installations de dosage automatiques.



*Pigments sous forme de poudre (à gauche) et de grains (à droite)
Photos : Bart Helincks, Catha*

- De nombreuses couleurs sont également disponibles sous forme liquide (slurry) (poudre en suspension). Un colorant liquide est facile à doser et simplifie le processus de mélange, ce qui permet de réaliser celui-ci en camion-mixer. Il présente cependant l'inconvénient de nécessiter l'utilisation d'une pompe équipée d'une installation de dosage. Comme une fraction seulement du colorant liquide est constituée de particules solides (un pourcentage qui doit être déclaré par le fabricant), il convient d'adapter le dosage. Grosso modo, on peut estimer qu'1 kg de colorant liquide contient 600 g de poudre, c'est-à-dire qu'1 % de poudre correspond à 0,6 % de colorant liquide. Ainsi, si les spécifications prévoient par exemple 3 % de pigments (matière solide - poudre), il conviendra d'adapter le dosage sous forme liquide à concurrence de $3/0,6 = 5$ %.
- Les sachets solubles dans l'eau ou « *Cold Water Soluble Bags* » sont faciles à utiliser et permettent un mélange dans un camion-mixer. Il s'agit de la forme la plus appliquée en cas de béton prêt à l'emploi. La quantité de sachets ne correspond pas toujours au dosage souhaité en fonction de la teneur en ciment du béton. Il est donc préférable d'adapter le dosage de sorte à obtenir un nombre entier de sachets par m³.

Pigments sous forme de liquide (slurry) et de sachets solubles dans l'eau
 Photos : Bart Helincks, Cathay



Les colorants peuvent être d'origine organique ou minérale (synthétique ou naturelle). Les colorants organiques contiennent des liaisons carbone et sont de nature animale ou végétale. Ils sont très couvrants, mais leur coloration est moins stable que celle des colorants anorganiques et ils peuvent même, si l'on applique le très faible pourcentage d'utilisation recommandé (maximum 1 %), entraîner une diminution considérable de la résistance au gel du béton. Les colorants minéraux d'origine naturelle présentent pour leur part un pouvoir colorant moindre. Il est tout de même recommandé d'utiliser des pigments synthétiques minéraux (ou anorganiques).

À cet égard, les colorants synthétiques minéraux les plus connus et les plus appliqués sont les oxydes de fer :

- Fe_3O_4 – oxyde de fer(II,III) ou magnétite : gris à noir
- Fe_2O_3 – oxyde de fer(III) ou hématite : rouge
- $\text{FeO}(\text{OH})$ – oxyde de fer hydraté ou goethite : jaune

L'orange, le beige et le brun sont obtenus par mélange de ces pigments. Pour d'autres couleurs, on peut utiliser des pigments synthétiques à base d'autres liaisons métalliques :

- Cr_2O_3 – oxyde de chrome : vert
- TiO_2 - dioxyde de titane : blanc
- CoAl_2O_4 - aluminat de cobalt : bleu

En ce qui concerne les colorants organiques pour le béton, on connaît surtout le « *carbon black* » ou noir de carbone ou suie.

Les pigments sont des adjuvants relativement onéreux susceptibles d'influencer fortement le prix de revient du béton et assurément en cas de dosages élevés. Les pigments rouges et noirs sont généralement moins coûteux que les jaunes et bruns, alors que les pigments verts et bleus sont de loin les plus chers.



Béton frais de couleur brunâtre obtenu par l'utilisation d'un mélange de 60 % de pigments anthracite, 20 % de pigments jaunes et 20 % de pigments rouges.

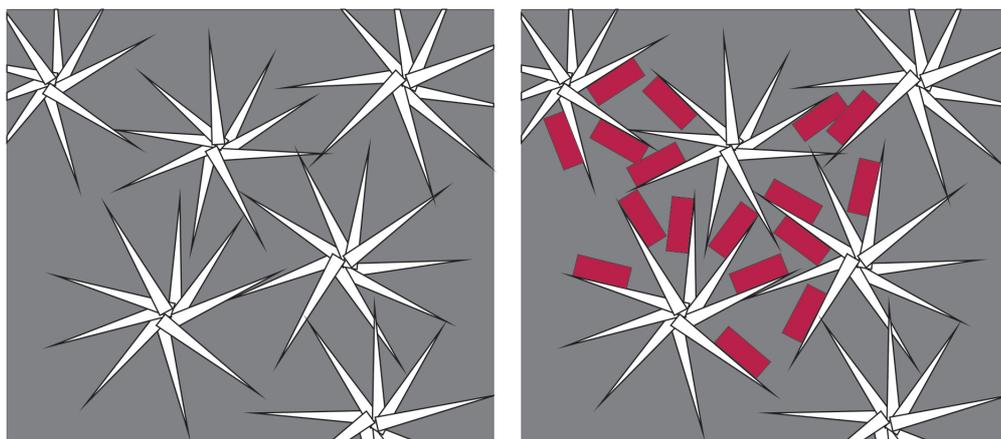
Photo : Bart Helincks, Cathay

Complexe résidentiel Giardin, Samedan (CH) (arch. Mierla & Kurt Lazzarini, photo Grace)

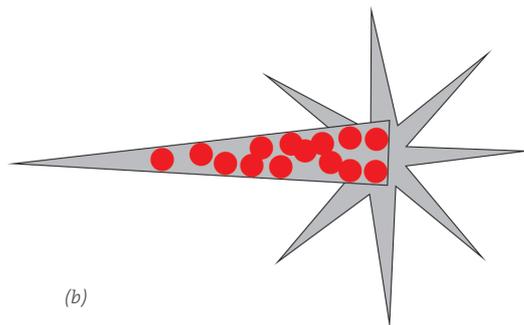


La réaction du ciment et de l'eau forme des produits d'hydratation. Sur le plan microscopique, on peut les présenter de manière simplifiée comme des aiguilles de cristal. Les grains de pigment, environ 20 x plus petits que ceux du ciment, vont se nicher physiquement entre ces pointes.

Hydrates de ciment
et pigments :
(a) grains de pigments nichés
entre les aiguilles
de cristal
(b) attraction
électrostatique des
oxydes métalliques



(a)



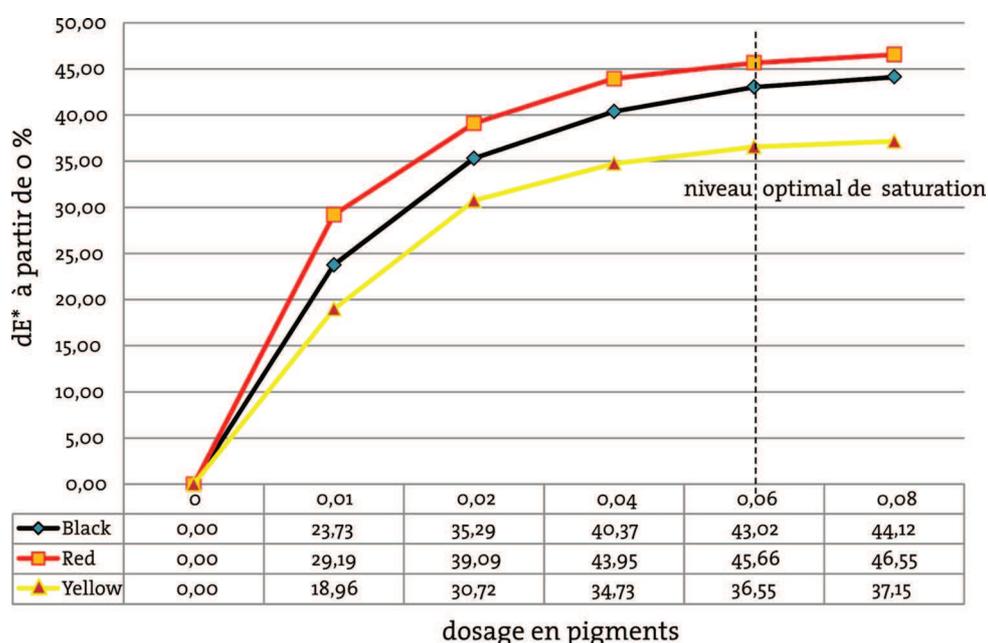
(b)

En cas de pigments à base d'oxydes métalliques, une attraction électrostatique assure en outre une liaison stable. Cette liaison électrostatique n'intervient pas dans le cas du noir de carbone, ce qui explique qu'une couleur noire intense au départ peut s'estomper totalement avec le temps. Comme les hydrates de ciment favorisent la dispersion de la lumière, le niveau d'hydratation du béton joue un rôle important dans la perception des couleurs. Une hydratation accrue signifie plus d'aiguilles de cristal sur le plan microscopique et, par conséquent, une diffusion accrue de la lumière, d'où une couleur plus pâle. Nous reviendrons également sur cette propriété lorsque nous examinerons les facteurs d'influence et le vieillissement du béton coloré.

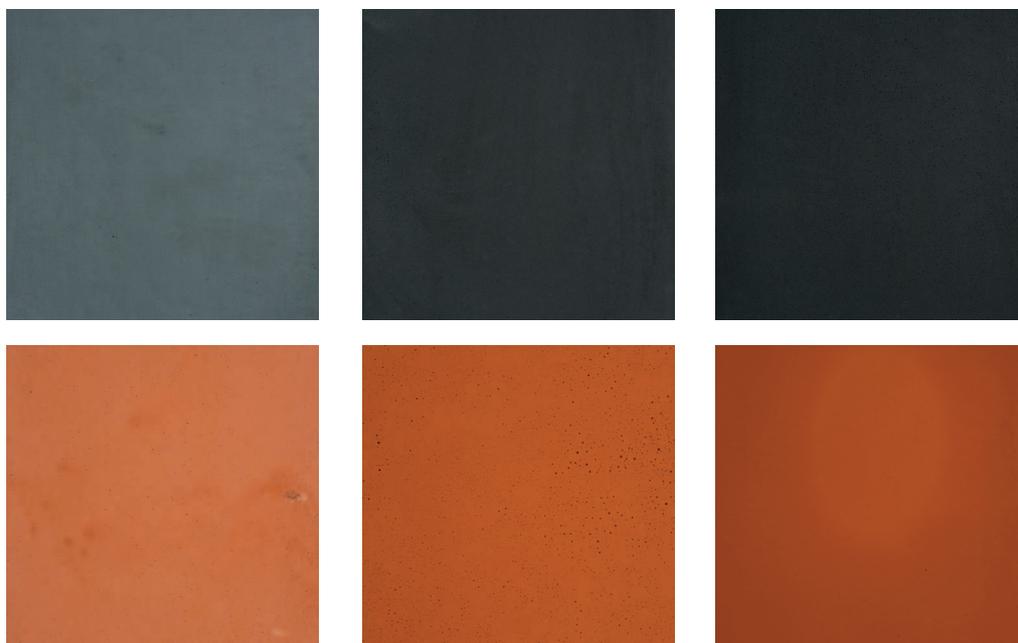
Le pigment étant intégré dans la matrice du ciment durci, le dosage de pigments s'exprime également en pourcentage de la teneur en ciment ou, pour être plus précis, en pourcentage de la teneur en liant.

Par exemple, un béton destiné à la réalisation d'un élément de construction en béton armé en zone côtière ES4 (contact avec l'eau de mer, zone exposée aux marées et aux éclaboussures) contient 340 kg/m^3 de ciment. Un dosage de pigments à raison de 5 % signifie donc 17 kg de pigment (de matière sèche) par m^3 .

L'intensité chromatique d'une surface en béton augmente de manière linéaire à mesure que l'on accroît la teneur en pigments. À partir d'une certaine teneur, l'intensité chromatique n'augmente plus guère et on parle alors de saturation chromatique. Sur le plan microscopique, les pigments ont alors recouvert toute la surface, voire même déposés plusieurs couches sur les aiguilles de ciment, sans que cela influence encore davantage la couleur. La figure ci-dessous présente l'évolution de l'intensité chromatique en fonction du dosage. Ces courbes dépendent du type de pigment mais peuvent également varier selon le type de ciment. En pratique, on applique rarement des teneurs supérieures à 5 %.



Influence de la teneur en pigments sur l'intensité chromatique (Figure Cathay)



Influence du dosage sur la couleur du béton (avec un ciment blanc CEM I, des pigments Scholtz noir et rouge, sable lavé, rapport E/C = 0,45)
 À gauche : 2 %
 Au centre : 6 %
 À droite : 10 %
 (Photo : Betoniek 16/12)

3. BÉTON COLORÉ : FACTEURS D'INFLUENCE

La couleur finale d'une surface en béton ne dépend pas uniquement du pigment utilisé, mais aussi des différents composants et des méthodes de mise en œuvre du béton. C'est pourquoi il est important, pour obtenir une couleur constante, d'utiliser toujours les mêmes matières premières et la même composition, mais aussi de standardiser le processus d'exécution. Ci-après, nous expliquerons brièvement dans quelle mesure ces différents facteurs influencent l'aspect extérieur du béton.

*Malines – Veemarkt
(Arch. Secchi-
Vigano – réalisation
de 2003-2005) :
généralement, le résultat
attendu est une couleur
de béton uniforme. Dans
ce projet, les architectes
ont cependant opté
pour une variation de
l'intensité chromatique
en diversifiant les
dosages de colorant
utilisés dans les charges
successives de béton
prêt à l'emploi*



3.1 COMPOSANTS

• RAPPORT EAU-CIMENT

Un facteur eau-ciment plus élevé accroît le nombre de pores dans la surface du béton et, sur le plan microscopique, il augmente le développement des aiguilles de ciment. La dispersion de la lumière est alors plus forte et la surface du béton pâlit. À l'inverse, une diminution de la quantité d'eau donnera lieu à une surface plus foncée.

*Influence du facteur
eau-ciment sur la
couleur du béton
(échantillons réalisés au
moyen de mortier à base
de ciment CEM III/B) :
À gauche :
rapport E/C=0,6
À droite :
rapport E/C=0,3
(Photo : Betoniek 16/12)*



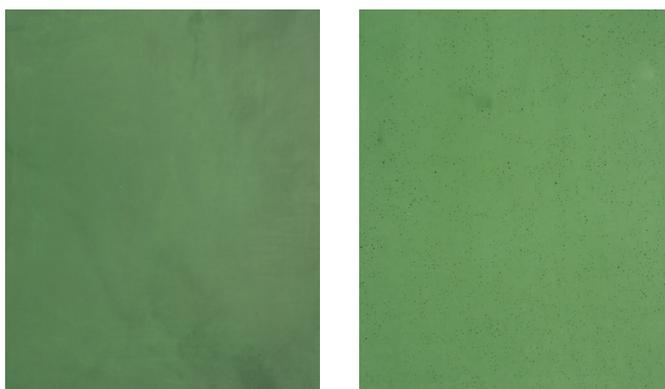
- TYPE DE CIMENT

Le mélange avec du gris réduisant l'intensité des autres couleurs, on peut renforcer leur intensité en utilisant un ciment blanc. Bien entendu, c'est le cas pour un béton blanc, mais l'influence est aussi relativement marquée pour des couleurs claires comme le jaune et le vert. Pour le noir en revanche, cet effet est limité.

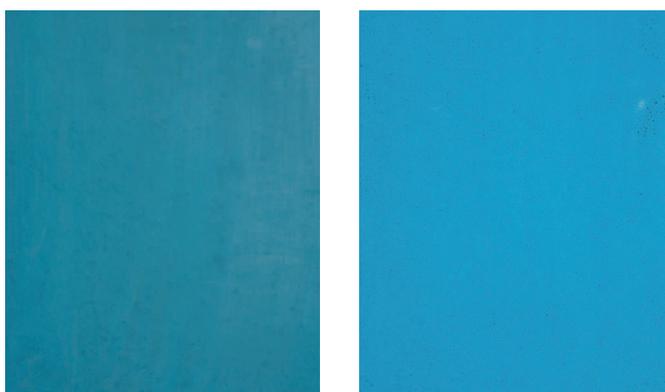
On relève également certaines différences parmi les ciments gris. Ainsi, le ciment de haut fourneau CEM III est plus clair que le ciment Portland CEM I compte tenu de l'addition des laitiers de haut fourneau plus clairs au clinker Portland plus foncé. Dès lors, la couleur s'éclaircit à mesure que la teneur en laitier augmente (le ciment CEM III/C est plus clair que le CEM III/B, lui-même plus clair que le CEM III/A.). De plus, la finesse de mouture et l'origine du ciment jouent également un rôle.



Influence du type de ciment sur la couleur du béton
À gauche : ciment gris CEM I
Au centre : ciment CEM III/B et 30 % de ciment gris CEM I
À droite : ciment blanc CEM I
(Photos : Betoniek 16/12)



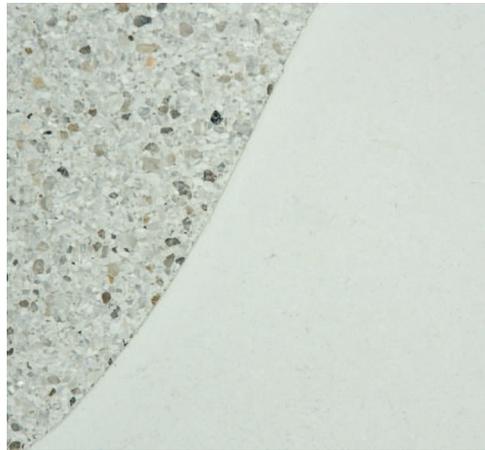
Influence du type de ciment sur la couleur du béton (6 % de pigments)
À gauche : ciment gris CEM I
À droite : ciment blanc CEM I
(Photos : Betoniek 16/12)



- TYPE DE SABLE

Ce sont surtout les particules les plus fines de la fraction de sable, comprises entre 0 et 0,250 mm, qui contribuent à déterminer la couleur du béton. Si les propriétés du sable sont les plus déterminantes en termes de technologie du béton, on peut tout de même opter dans une certaine mesure pour un sable assorti à la couleur du béton. Pour un béton plus sombre, on pourra utiliser (en partie) un sable de calcaire ou de basalte concassé plus sombre, tandis que, pour un béton clair, on optera (en partie) pour un sable de quartz blanc (par ex. du sable de Lommel ou de Mol). Un sable de Meuse jaune peut conférer une teinte beige au mortier. Comme c'est le cas pour le choix du ciment, l'influence du sable est plus déterminante pour les couleurs claires que pour les couleurs foncées.

Influence du sable sur la couleur du béton
À gauche : sable de rivière lavé – À droite : sable de rivière non lavé, riche en limon
(Photo : Betoniek 16/12)

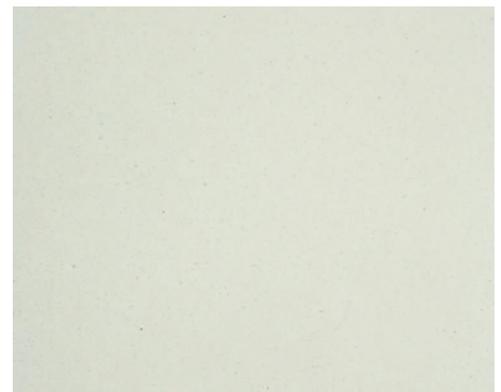
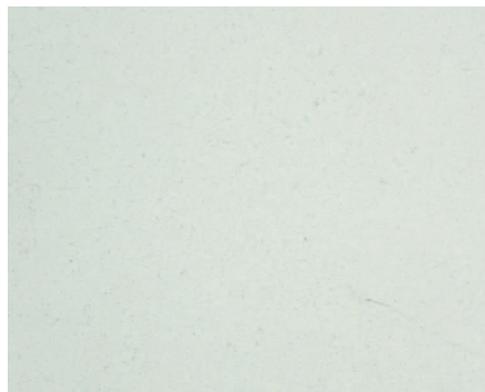


- ADJUVANTS

N'étant appliqués qu'en faibles quantités, les adjuvants n'exercent guère voire pas d'influence sur la teinte du béton. Néanmoins, certains liquides bruns (superplastifiant à base de naphthalène par exemple) peuvent parfois influencer la couleur.

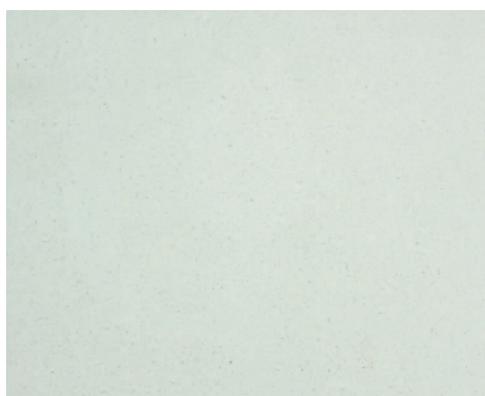
Un autre cas spécifique concerne l'interaction possible entre un superplastifiant de type PCE (éthers de polycarboxylate) et de l'oxyde de fer noir.

Influence de l'adjuvant sur la couleur du béton
(avec ciment blanc CEM I, sable blanc, facteur E/C : 0,40)
À gauche : adjuvant transparent (PCE) – À droite : adjuvant brun (naphthalène)
(Photo : Betoniek 6/12)



- UTILISATION D'ADDITIONS

Les additions influencent la couleur en raison de leur finesse (grains < 0,125 mm). Alors que la farine de calcaire et les laitiers de haut fourneau moulus sont de couleur claire, les cendres volantes de charbon broyé sont plus sombres, compte tenu de leur part de carbone noir, et assombrissent dès lors la surface et laissent parfois apparaître des taches noires. Ces additions sont souvent utilisés dans le béton apparent autocompactant, dont l'aspect et la couleur jouent un rôle important.



*Influence des additions sur la couleur du béton (avec ciment blanc CEM I, sable blanc, E/C : 0,45)
À gauche : filler calcaire
À droite : cendres volantes de charbon broyé
(Photo : Betoniek 16/12)*

3.2 PRODUCTION ET MISE EN ŒUVRE DU BÉTON

- MALAXAGE DU BÉTON

Il est recommandé de doser les pigments en même temps que le sable et les gravillons et de les prémélanger au moins 15 secondes avant l'ajout du ciment et de l'eau. Il convient d'observer un temps de malaxage suffisamment long – 1,5 à 2 minutes après avoir dosé l'eau – de manière à obtenir une coloration homogène. La quantité dosée de pigment et donc également le rapport pigment/ciment doivent être les plus constants possible, surtout pour les dosages faibles, afin d'éviter les variations de couleurs. Le dosage s'effectue en kg de pigment sec par kg de ciment. En cas de béton prêt à l'emploi, le malaxage du pigment (sous forme de poudre, de sachets solubles ou de slurry) s'effectue généralement dans le camion-mixer. Il convient alors d'observer un temps de malaxage d'env. 20 minutes afin d'obtenir une répartition homogène du pigment dans le béton frais.

- CURE

Certains produits de cure (curing compound) sont de couleur jaunâtre et restent apparents à la surface du béton. Ce phénomène est d'autant plus frappant en cas d'application irrégulière du produit. Ces nuances de teinte disparaissent avec le temps.

*Taches brunes
s'expliquant par un excès
d'huile de décoffrage
(Photo : Betoniek 16/12*

- HUILE DE DÉCOFFRAGE

À l'instar d'un produit de cure, une huile de décoffrage peut laisser aussi des traces temporaires ou permanentes à la surface du béton. Le type et la quantité d'huile de décoffrage, de même que l'homogénéité de l'application influencent la structure en surface et donc la dispersion de la lumière.



- COFFRAGE

Par leur rugosité, leur absorption et leur propreté, les panneaux de coffrage influencent également la qualité de la surface du béton après décoffrage et, par conséquent, l'intensité colorimétrique. Un coffrage absorbant et/ou rugueux donne une surface plus pâle.

- SÉCHAGE ET DURCISSEMENT DU BÉTON

En séchant, une structure de pores plus importante apparaît à la surface du béton, ce qui augmente la dispersion de la lumière. Sa couleur devient dès lors plus pâle.

La température de durcissement a également une certaine influence. Une température d'hydratation plus élevée accroît le développement de ciment durci. Il en résulte donc une augmentation des aiguilles au niveau microscopique, ainsi qu'une plus grande dispersion de la lumière, ce qui a pour effet de rendre la couleur de la surface plus pâle. Aussi convient-il de décoffrer dans le même délai les surfaces en béton dont on souhaite qu'elles présentent la même couleur.

- TRAITEMENT DE LA SURFACE DU BÉTON

Souvent, une finition de surface réalisée immédiatement après le coulage du béton ou après son durcissement aura aussi un impact sur la perception de la couleur. En effet, une surface réalisée à la brosse sera plus rugueuse qu'une surface lissée et présentera dès lors un aspect moins brillant. En cas de surface lavée, les pierres devenues apparentes en surface contribueront à déterminer l'aspect. En présence d'une surface de béton durcie, polie par ponçage sur quelques millimètres, la couleur gagnera en intensité à mesure que le grain utilisé pour le polissage sera plus fin. Les traitements comme le sablage ou le bouchardage rendent pour leur part la surface plus rugueuse et plus pâle. Les variations de porosité et de texture locales entraînent des différences de couleur ou de teintes de gris. D'autre part, la macrotecture a pour effet de rendre les variations chromatiques moins marquées.

- HUMIDITÉ

Une surface de béton humide ressemble plus à une surface lisse et fermée et présente une couleur plus sombre, plus intense que la même surface sèche. Ceci s'explique par le fait que les gouttes d'eau, qui enrobent le ciment durci et les pigments, entraînent une dispersion réduite de la lumière et une réflexion accrue.

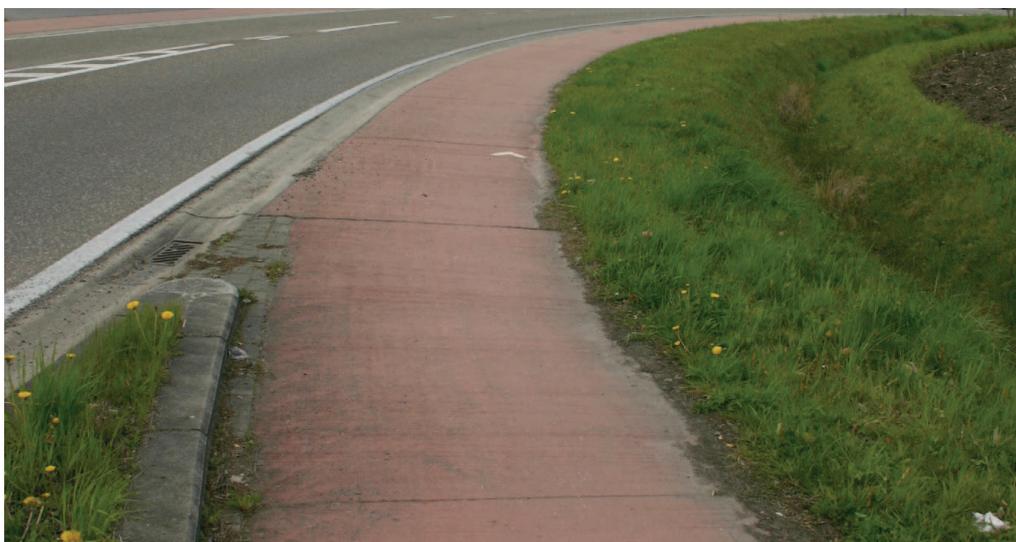
4. VIEILLISSEMENT DU BÉTON COLORÉ

La couleur d'une surface en béton dépend des conditions d'utilisation et de l'environnement auquel la surface est exposée. S'agissant de maintenir la couleur dans le temps, il convient de prendre cet élément en compte dès la conception de l'ouvrage. On peut également prévoir une protection de la surface, par exemple en appliquant un produit d'hydrofugation et d'imprégnation.

• SALISSURES ET VIEILLISSEMENT DE LA SURFACE EN BÉTON

La couleur peut varier dans le temps sous l'influence des intempéries, des conditions d'environnement (zone côtière, zone forestière, gaz d'échappement, ...) et/ou des sollicitations externes (charge de trafic, sels de déverglaçage, coups de lame, ...). À cet égard, on pense aux salissures dues aux dépôts verts de mousse ou d'algues, aux traces noires laissées par les pneus de véhicules, aux dépôts de poussières et de particules d'argile, aux traces de fuites d'eau, etc.

Le vieillissement a pour effet, surtout en cas de surfaces de béton décoffrées ou lissées, de faire disparaître la pâte de ciment de la couche de mortier externe, laissant apparaître ainsi en surface les particules brutes de sable ou de gravillons. Lorsque le mortier et les gravillons ont la même couleur, ce phénomène est moins frappant qu'en présence de couleurs contrastées. Les attaques dues aux cycles de gel-dégel et à l'exposition aux sels de déverglaçage entraînent également une surface plus rugueuse, de couleur moins intense, laissant éventuellement apparaître des granulats.



Salissures sur la surface de béton d'une piste cyclable

• EXSUDATION DE CHAUX

Ces dépôts de chaux se manifestent sous la forme de taches blanches, d'un voile blanc, de poudre voire parfois même de croûtes blanches à la surface du béton. Ceci s'explique par la microstructure poreuse du béton, permettant le transport interne d'humidité. Les dépôts se présentent tant sur les surfaces horizontales que verticales et se manifestent relativement vite.

Les pigments sont inertes et n'exercent donc pas d'influence sur le phénomène d'exsudation de chaux. Toutefois, les taches blanches sont bien plus gênantes sur les surfaces en béton coloré, en particulier sur le béton noir. Si l'exsudation de chaux se manifeste sous la forme d'un voile blanc, la surface présente un aspect plus pâle que souhaité. Par ailleurs, l'exsudation de chaux n'influence pas la résistance mécanique ou la durabilité du béton.

*Exsudation de chaux sur
des dalles préfabriquées
en béton noir*



Parfois, le phénomène d'exsudation de chaux peut être évité par la fabrication d'un béton bien fermé (faible facteur eau/ciment, bonne compaction et cure). Il est important de protéger le béton qui vient d'être coulé ou les produits décoffrés de la pluie et de la neige. Si le phénomène se produit néanmoins, on peut dans certains cas procéder à un nettoyage au moyen d'une solution d'acide chlorhydrique (HCl, 1 à 3%) diluée à l'eau.

- RÉACTIONS CHIMIQUES OU PHYSIQUES DES PIGMENTS

Les pigments anorganiques à base d'oxydes de fer ne subissent pas de modifications chimiques ou physiques lors du gâchage du béton, de la phase de durcissement ou ultérieurement. Ils sont stables et demeurent indissolublement liés au liant dans le béton. La norme NBN EN 12878 permet de préciser ces caractéristiques.

Cependant, ce n'est pas toujours le cas des pigments organiques. Le pigment noir « noir de carbone » ou suie n'est pas stable et perd donc en intensité colorimétrique avec le temps.

Le bleu outremer, un colorant à base d'un minéral naturel, peut réagir avec le ciment : les ions de sodium du pigment sont remplacés par des ions de calcium du ciment, entraînant une perte d'intensité chromatique.

- POURSUITE DE L'HYDRATATION DU CIMENT

Contrairement au pigment, le liant qu'est le ciment, combiné éventuellement à des adjuvants, subit évidemment bien des modifications. Comme nous l'avons vu, cette transformation va de pair, sur le plan microscopique, avec une poursuite de la formation d'hydrates de ciment dans le béton durci qui entraînent une dispersion de la lumière donnant lieu, par conséquent, à une surface de béton plus pâle. Comme l'hydratation du ciment se poursuit encore au fil du temps et surtout au cours des premiers mois suivant le coulage du béton ou la fabrication de l'élément en béton, la formation de ces hydrates se poursuit. C'est davantage le cas des ciments à prise plus lente, comme les ciments de haut fourneau CEM III que des ciments Portland plus rapides CEM I. Par conséquent, la couleur peut pâlir par rapport au moment du coulage ou de la fabrication. Cet effet est plus prononcé pour les objets de couleur sombre que pour ceux de couleur claire.

- INFLUENCE DU CIMENT DE HAUT FOURNEAU

On constate parfois, en cas d'utilisation de ciment de haut fourneau, l'apparition de taches plus sombres (bleues/vertes) peu de temps après la mise en œuvre/la production. Celles-ci sont dues à une réaction des laitiers de haut fourneau, libérant du sulfure de fer (FeS) et du sulfure de manganèse (MnS), de couleur bleue/verte. Au contact de l'air, ces sulfures sont convertis en sulfates (FeSO₄ et MnSO₄), qui ne présentent plus de couleur bleue/verte, ce qui explique pourquoi, au contact de l'air, le béton perd cette couleur bleue/verte pour prendre la couleur souhaitée



Taches bleues/vertes sur un revêtement extérieur de couleur ocre



Le même revêtement après disparition des taches

(Photos : Bart Helincks, Cathay)

5. INFLUENCE DU PIGMENT SUR LA QUALITÉ DU BÉTON

Comme nous l'avons évoqué, les pigments sont inertes et ne subissent donc pas de modification chimique ou physique dans le béton et ne sont donc pas de nature à accroître ou réduire directement la résistance du béton.

Toutefois, les pigments sont de très fines poudres dont le besoin en eau est très élevé, ce qui diminue l'ouvrabilité du béton. Le fabricant de béton doit prendre cet aspect en compte en adaptant la composition du béton. En outre, l'ouvrabilité d'un béton pigmenté peut se réduire plus rapidement, ce qui peut donner l'impression d'une prise accélérée. L'ajout d'eau pour accroître l'ouvrabilité ne favorise pas la durabilité et, par ailleurs, elle n'est pas autorisée pour des compositions de béton certifiées. Dès lors, il est recommandé de limiter la teneur en pigments à maximum 5 % de la masse de ciment.

L'utilisation de pigments sans adaptation de la teneur en eau – éventuellement par le recours à un (super)plastifiant - peut même accroître la compacité, la résistance et la durabilité du béton. C'est ce qu'ont révélé des essais effectués sur du béton routier, mettant à l'épreuve la résistance à l'écaillage lors de cycles de gel-dégel, en présence de sels de déverglaçage. Les pigments comblent alors les pores du béton, réduisant la capacité de transport interne de substances agressives. Dans le cas d'un béton avec entraîneur d'air, il est possible qu'en présence des fines particules de pigments, il faille augmenter la dose d'entraîneur d'air pour atteindre la même teneur en air visée.



6. PRESCRIRE ET ÉVALUER LE BÉTON COLORÉ

Il est très difficile de décrire clairement une couleur que l'on souhaite donner au béton et il est tout aussi complexe de procéder, après l'exécution, à une évaluation objective du résultat.

Décrire une couleur en parlant de « rouge foncé », de « brun ocre » ou de « bleu-vert » permet peut-être de fournir une première indication, mais pas de fixer définitivement et avec précision le résultat souhaité, ce qui peut dès lors prêter à discussion.

Une autre possibilité consiste à prescrire un pourcentage déterminé de colorant pour une couleur précise. Mais ici aussi, les différences d'intensité chromatique entre les divers pigments peuvent donner des résultats différents. Ce faisant, on ne tient d'ailleurs pas compte non plus d'autres facteurs d'influence dans la composition du béton. À cet égard, une meilleure solution peut consister à

produire, dès la phase d'étude et de projet, une éprouvette de béton coloré conforme aux souhaits de l'architecte et/ou du maître d'ouvrage et pouvant servir de référence au cours de la phase de soumission et d'exécution. Cette éprouvette doit être suffisamment grande (par exemple, 1 m²) pour permettre une évaluation objective de la couleur et être produite de manière analogue (composition du béton, compactage, coffrage, ...) au mode de production ultérieur sur chantier. Accompagnée d'une description de la couleur et d'une teneur en pigments indicative, cette éprouvette doit permettre au soumissionnaire de fixer un prix correct pour la composition du béton et à l'exécutant de se rapprocher au maximum de la couleur de référence. Dans certains cas, il est même recommandé de couler un élément de construction entier en béton coloré à titre de référence.



Il est parfois fait référence à un catalogue de couleurs ou à un nuancier comme le système RAL (*Reichsausschuß für Lieferbedingungen*), développé en 1927 par l'Institut allemand pour l'assurance qualité et le marquage associé, et visant à définir les couleurs utilisées pour les peintures et coatings. Il n'est pas judicieux d'utiliser ce code couleurs pour



les surfaces en béton. Dans certains cas, on pourra fournir tout au plus une indication de la couleur souhaitée, comme en la décrivant au moyen de mots. Il en va d'ailleurs de même pour d'autres systèmes de nuanciers comme le système Pantone, utilisé pour le secteur textile et les travaux d'impression.

*Herstal – Pôle Marexhe
(Arch. MULTIPLE) :
À gauche : éprouvette
sur le chantier, à
dimensions réelles.
À droite : bâtiment de la
gare, après achèvement
(Photo : Filip Dujardin).*

Une autre approche consiste enfin à définir une couleur au moyen de coordonnées chromatiques. Le système Hunter Lab, développé en 1957, permet ainsi de décrire une couleur au moyen de 3 coordonnées :

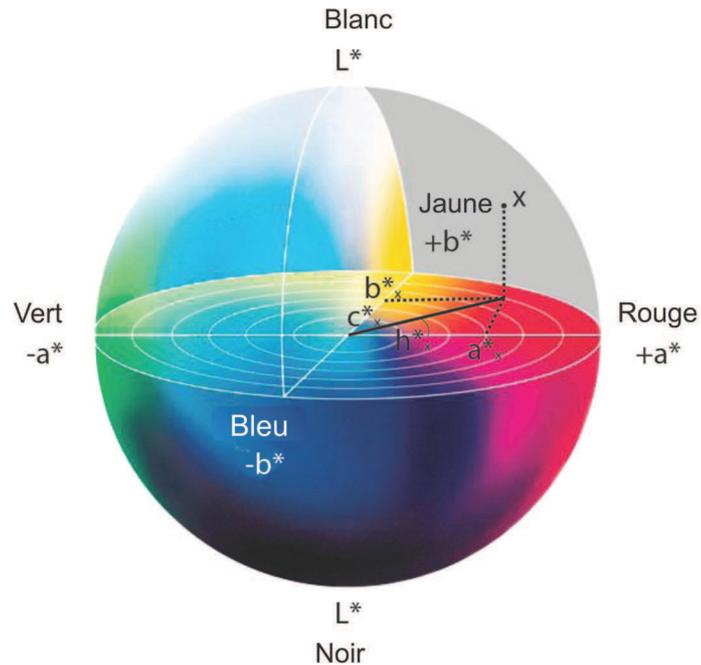
- Soit L a b avec : L = clarté, a = part de rouge-vert, b = part de jaune-bleu ;
- Soit L c h avec : L = clarté, c = saturation, h = teinte.

En 1976, le système CIELAB amélioré (CIE = Commission internationale de l'Éclairage) a vu le jour. Il s'appuie sur les coordonnées $L^*a^*b^*$. La présence des astérisques est importante dans la mesure où, à couleur identique, les valeurs de ces coordonnées diffèrent fortement de celles du premier système sans astérisques.

La clarté L^* de la couleur est comprise entre 0 (noir) et 100 (blanc).

Le chroma ou la couleur s'exprime au moyen de a^* et b^* ; $+a^*$ correspondant à l'axe rouge et $-a^*$ à l'axe vert, tandis que $+b^*$ et $-b^*$ représentent respectivement l'axe jaune et l'axe bleu. Aucune limite n'a été fixée pour a^* et b^* mais on peut admettre en général qu'elles sont comprises entre -100 et +100.

Espace colorimétrique
 $L^*a^*b^*$
(Photo : CRR – Réf. 7)



Pour définir une différence de couleur entre une éprouvette et une couleur de référence, on peut utiliser la formule suivante dans l'espace colorimétrique :

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

La formule exprime la distance entre deux points dans l'espace colorimétrique $L^*a^*b^*$. Hélas, cette distance quantifiée ne correspond pas toujours à la différence chromatique observable par l'œil humain. En d'autres termes, on pourra, pour une même valeur de ΔE^* , ne percevoir qu'une différence minimale pour une couleur déterminée et, pour une autre couleur, observer une forte différence chromatique. Ce phénomène s'explique notamment par la répartition non uniforme des couleurs dans l'espace colorimétrique. Aussi convient-il de corriger la formule si on souhaite en faire usage dans un contrat pour déterminer les différences chromatiques admissibles.

Les mesures de couleur sont réalisées à l'aide d'un « spectrophotomètre ». Cet appareil imite le fonctionnement de l'œil humain. Un objet est éclairé par une source lumineuse intégrée. Le rayonnement réfléchi est analysé par l'appareil qui affiche le résultat sous la forme des trois coordonnées chromatiques $L^*a^*b^*$. Le résultat dépend de divers paramètres tels que la source lumineuse utilisée et l'angle de vue sous lequel la mesure est effectuée.



Exemple de spectrophotomètre

Le CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction), tout comme le CRR (Centre de Recherches Routières), ont effectué des recherches sur les différentes techniques de mesure et leur interprétation. Cependant, jusqu'à ce jour, aucune méthode standardisée de mesure et d'évaluation n'est disponible pour les surfaces en béton coloré.



Bâtiment public à Ruschlikon, Suisse
photo : Grace Construction & Packaging



Bâtiment Origin à La Haye,
des architectes Beekink et Molenaar

BÉTON COLORÉ POUR REVÊTEMENTS EXTÉRIEURS RÉALISÉS AU MOYEN DE BÉTON COULÉ IN SITU OU D'ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS EN BÉTON

Le béton coloré est souvent utilisé pour l'aménagement de revêtements (routiers), parfois pour des raisons fonctionnelles, parfois pour des motifs purement esthétiques. L'objectif fonctionnel consiste généralement à accroître la « lisibilité » de la voirie, afin d'y sécuriser le trafic. Les pistes cyclables colorées en sont l'exemple le plus connu. Les revêtements décoratifs en béton sont appliqués notamment pour l'aménagement d'espaces publics. Les revêtements colorés peuvent être réalisés tant en béton coulé qu'au moyen d'éléments préfabriqués.

Notons par ailleurs que pour des raisons de sécurité, la surface d'un revêtement extérieur doit présenter une certaine rugosité. En effet,

une surface à finition lisse peut entraîner le glissement des piétons et des cyclistes ou nécessiter de trop longues distances de freinage pour le trafic motorisé. Aussi, la réalisation d'un revêtement de couleur brillante n'est pas possible non plus.

Les finitions de surface les plus communes pour du béton coulé in situ consistent en un brossage transversal ou longitudinal de la surface ou encore en un lavage chimique. Le brossage est appliqué notamment pour les pistes cyclables, les voies de circulation locales et les chemins agricoles. Dans ce cas, seul le mortier coloré est apparent en surface. Les gravillons ne le sont pas. La couleur du mortier détermine donc totalement l'apparence de la surface.

À gauche : finition de surface d'une piste cyclable de couleur rouge par balayage transversal.

À droite : finition de surface d'une piste cyclable de couleur ocre à Leuven réalisée par balayage transversal.



Pour le béton lavé, le mortier, mais également les gravillons, sont apparents en surface. Les couleurs du mortier et les gravillons (colorés) peuvent être assortis ou choisis par contraste. Souvent, il est plus intéressant d'obtenir

la couleur souhaitée d'un revêtement en exposant à la surface les gravillons colorés voulus en nombre suffisant, et en combinant leur utilisation à celle de colorants ajoutés au béton pour obtenir un mortier coloré.



Exemple de carrefour en béton lavé noir à Tremelo. La couleur noire a été obtenue principalement par l'utilisation de concassé noir, en l'occurrence du basalte, additionné d'une petite fraction de pyrite brillante (laitier de silicate d'aluminium noir foncé). Le mortier anthracite a été obtenu par l'addition de 4 % de colorant noir au béton.

Les pavés de rue en béton sont disponibles dans une vaste gamme de couleurs et en différents types de finition de surface (lavée, sablée, bouchardée, ...). Ils sont fabriqués en usine par compactage à très haute pression de béton humide dans un moule. Les pavés sont dits « stables à la couleur » s'ils sont produits en deux couches, la couche de surface (4 à 10 mm d'épaisseur) présentant une teneur relativement élevée en ciment et en pigments, et dont la couleur est soutenue par celle des granulats.



Utilisation de pavés de rue en béton coloré pour distinguer les fonctions de trafic ou à des fins décoratives.

L'utilisation de (méga)pavés et de dalles préfabriquées en béton coloré est également assez répandue pour l'aménagement d'espaces publics tels que les places et les zones piétonnes.



Revêtement d'une place à Redu au moyen de dalles de béton préfabriquées à finition acidée, combinées à des bandes blanches en béton



T-6

Ce bulletin est publié par

FEBELCEM

Fédération de l'Industrie cimentière belge
Boulevard du Souverain, 68 - 1170 Bruxelles
tél. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@febelcem.be

Auteur :

Ir L. Rens, FEBELCEM

Photos :

FEBELCEM sauf mention contraire

Dépôt légal :

D/2016/0280/08

Ed. resp. :

A. Jasienski

infobeton.be

BIBLIOGRAPHIE

1. Gekleurd beton, BETONIEK, Vereniging Nederlandse Cementindustrie, 's Hertogenbosch, février 1990
2. De kleur van beton, BETONIEK, volume 16, édition 12, 2015
3. GEORGE M. (Cathay Industries), Sources of colour variation
4. KOHNERT L. (Lanxess), Règles fondamentales pour résultats optimaux de coloration des matériaux de construction, article paru dans le PBI – Préfa Béton International, édition 5, 2014
5. LUDWIG M. (Ludwig GmbH); WEBER P.(Scholz GmbH), Comment l'eau peut-elle influencer sur la clarté d'une surface en béton, article paru dans le PBI – Préfa Béton International, édition 6, 2012
6. NBN EN 12878:2014 - Pigments de coloration des matériaux de construction à base de ciment et/ou de chaux – Spécifications et méthodes d'essai
7. Méthode de mesure de la couleur des revêtements bitumineux colorés – Détermination sur des carottes bitumineuses, CRR, MF 90/15, Bruxelles, 2015
8. VEIT A.M. (Huntsman), Suggestions for improving colored concrete products, 2015
9. WEBER P., Scholz GmbH Décoloration de la surface des pavés en béton. Article paru dans le PBI – Préfa Béton International, édition 6, 2015
10. WEBER P.(Scholz GmbH), Verblässende Betonsteinoberfläche, présentation lors des 58e « Betontage » (Journées du béton), Ulm, 2014
11. Mesures de couleur sur matériaux de parachèvement, article paru dans le CSTC-Contact 2014/4
12. Vers une appréciation plus objective des couleurs et des écarts admissibles, article paru dans le CSTC-Contact 2015/3

