

Dixième édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Cachan, France
2-3 juillet 2009

LE BÉTON APPARENT : INFLUENCE DE L'ÉTAT DE SURFACE DU MOULE SUR L'ASPECT DES SURFACES

M. Martin, C. Goffinet, N. Migeotte, L. Courard, F. Michel
Université de Liège, Département ArGenCo, GeMMe Matériaux de Construction, Liège, Belgique

RÉSUMÉ : L'aspect d'un parement en béton (teinte et bullage) dépend entre autres de la surface de coffrage utilisée. L'influence du nombre de réutilisations des coffrages sur la teinte et le bullage de surface a été étudiée. Deux séries de moules en bois contreplaqué et OBS ont été utilisés afin de simuler de 1 à 118 réutilisations pour le contreplaqué et de 2 à 51 réutilisations pour le bois OSB. Les moules ont ensuite été utilisés pour couler des cubes de béton. La première série a été coulée en utilisant une huile végétale et la deuxième une huile minérale. La teinte et le bullage en surface des bétons coulés ont été mesurés et étudiés au travers d'une étude statistique afin de déterminer l'influence de la réutilisation des coffrages sur l'aspect des parements.

1. INTRODUCTION

De nombreux paramètres influencent la teinte des parements en béton : E/C, mise en place, type de sable utilisé, type de coffrage, etc., (Lemaire, 2003). Le coffrage permet de donner au béton sa forme et sa texture. Il représente de 25 à 75 % du prix de revient du béton : cet élément ne doit donc pas être négligé (Apers et al, 2006), d'autant plus que le béton durci représente le négatif de la surface coffrante (Martin, 2007). Afin d'obtenir une surface de béton relativement uniforme, le coffrage doit être propre et doit avoir des caractéristiques de surface relativement homogènes, particulièrement en ce qui concerne l'absorption d'eau. (Monks, 1974 ; Murphy, 1967). Les panneaux de coffrage en bois sont couramment utilisés comme peau de coffrage. Ces panneaux peuvent être découpés, assemblés et réutilisés (Schmidt-Morsbach 1981). Il est généralement admis qu'au fur et à mesure de leurs réutilisations, les pores des panneaux de coffrage en bois se bouchent et la teinte des éléments en béton s'éclaircit (Apers, 2000). Ces éléments semblent aussi s'appliquer pour les coffrages de type contreplaqué ou OSB. Dans la pratique, le nombre de réutilisations des coffrages est fixé entre 30 et 60 pour le contreplaqué et environ 20 pour le bois OSB (Pepe, 2007). L'évolution des propriétés des coffrages et leurs effets sur l'aspect (teinte et bullage) avec le nombre de réutilisations n'a pas été étudié.

Deux séries de plaques de coffrage en bois contreplaqué et OSB ont été utilisées pour simuler de 1 à 118 réutilisations pour le contreplaqué et de 2 à 51 réutilisations pour le bois OSB. La première série est réalisée avec une huile minérale et la deuxième avec une huile végétale. Ces panneaux ont ensuite été utilisés pour couler des cubes de béton. Le bullage et la teinte des cubes de béton ont été mesurés. L'influence de la réutilisation des coffrages sur l'aspect des parements a été étudié au travers d'une étude statistique de ces résultats.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Usure des panneaux de coffrages

Les coffrages utilisés sont des cubes d'environ 25 cm de côté :

- 12 cubes en contreplaqué : 6 pour l'huile minérale et 6 pour l'huile végétale,
- 4 cubes en bois OSB : 2 pour l'huile végétale et 2 pour l'huile minérale.

Pour chacun de ces cubes, les 5 côtés ont été identifiés et démontés. Les plaques obtenues ont été usées de la façon suivante.

- a) mise en place d'une couche d'huile au pinceau puis raclage de la surface,
- b) temps d'attente de 30 min (temps minimum recommandé par le fabricant de démoulant),
- c) réalisation d'un mortier de rapport E/C d'environ 0,45,
- d) étalement du mortier sur la plaque de coffrage à l'aide d'une truelle,
- e) séchage du mortier pendant 2 heures,
- f) démoulage de la plaque,
- g) nettoyage avec une raclette puis un chiffon humide.

Ces opérations ont été répétées jusqu'à l'obtention de l'usure désirée pour la plaque. Chaque cycle correspond à une utilisation de la plaque. Les échéances étudiées sont :

- Contreplaqué : 1, 2, 3, 5, 7, 12, 17, 22, 32, 42, 47, 52, 57, 62, 66, 71, 76, 81, 90, 100, 108, 118 jours, respectivement et
- OSB : 2, 4, 9, 11, 16, 21, 26, 31, 41, 51 jours.

2.2 Réalisation des cubes de béton

Lorsque toutes les plaques de coffrage sont à l'échéance de réutilisation prévue moins 1, les cubes sont remontés et des joints en silicone sont réalisés pour assurer l'étanchéité. Après 24 heures, les cubes sont enduits de démoulant et, après un temps de pose de 30 minutes, un même mélange de béton est coulé dans les cubes. Afin de s'assurer de l'homogénéité du mélange pour les différents cubes, ils ont été réalisés à partir d'un même mélange de béton livré par toupie au laboratoire. Le mélange utilisé est décrit au tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques du béton livré.

Classe de résistance	C25/30
Type de béton / Classe chlorure	Béton armé / (Cl 0,40%)
Classe d'environnement	EE2
Consistance	S4
Granularité (DMax)	8 mm Calcaire
Ciment	CEMIII/A 42,5 N LA

Les cubes sont mis en place sur la table vibrante en veillant à utiliser une procédure de mise en place identique pour tous les cubes. Ils sont ensuite gardés 48 heures sous jute humide, démoulés et laissés 2 semaines au laboratoire. Au démoulage, chaque face du cube est soigneusement identifiée dans la mesure où elles correspondent à des échéances de réutilisation du coffrage données. Le suivi des paramètres de teinte et de bullage est réalisé pour chaque face du cube, spécifiquement.

2.3 Mesures de la teinte et du bullage de surface

2.3.1 Mesures de la teinte

Pour toutes les faces des cubes, les coordonnées colorimétriques (trichromatiques) sont mesurées à l'aide d'un colorimètre en coordonnées L^* , a^* , b^* : 6 mesures par face sont réalisées de manière à obtenir une mesure colorimétrique sur l'ensemble de la surface. Les coordonnées colorimétriques

sont mesurées aux mêmes endroits pour toutes les surfaces. La cartographie des mesures est donnée à la Figure 1.

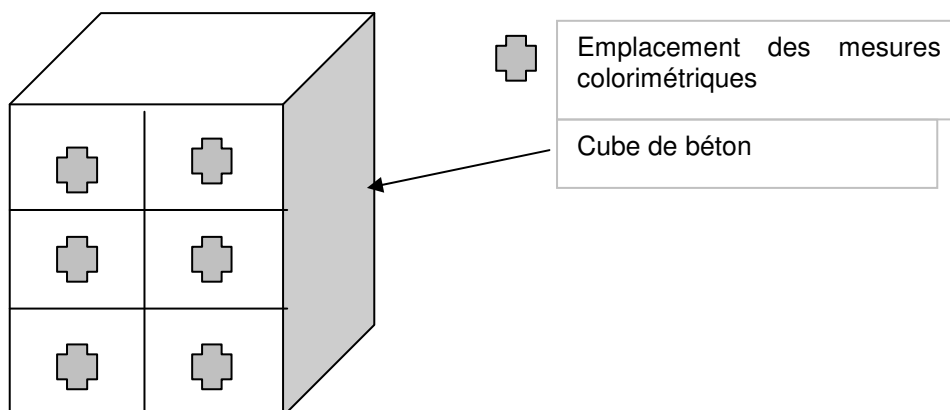


Figure 1. Cartographie des emplacements utilisés pour les mesures colorimétriques

2.3.2 Mesures du bullage

Les faces des cubes, après avoir placé un repère dimensionnel sur la surface, sont prises en photo dans des conditions d'éclairage spécifiques. Les photographies obtenues sont traitées à l'aide d'un logiciel d'analyse d'images afin de déterminer la proportion de la surface occupée par des bulles de diamètre compris entre 2 et 15 mm : les bulles de diamètre inférieur à 2 mm ne sont pas considérées comme visibles et les vides de taille supérieurs à 15 mm ne sont pas des bulles d'air (CDC-BET).

La procédure de traitement des images est la suivante :

- ouverture de l'image avec le logiciel,
- calibration de l'image en donnant au logiciel la dimension réelle du repère,
- découpe de l'image de façon à n'avoir que la surface du parement,
- transformation de l'image couleur en image en niveaux de gris,
- utilisation de la fonction « adjust threshold » pour extraire le bullage par seuillage en niveaux de gris,
- application d'un filtre médian pour réduire le bruit de l'image,
- utilisation de la fonction « Analyze Particles » pour déterminer le nombre de bulles, leur diamètre de Ferret et leur surface,
- calcul de la surface totale du parement occupée par des bulles de diamètre compris entre 2 et 15 mm,
- calcul de la proportion de la surface occupée par des bulles d'air de diamètre compris entre 2 et 15 mm, en déterminant le rapport de la surface des bulles sur la surface totale du parement multiplié par 100.

La Figure 2 montre un exemple de photographie prise avant traitement informatique. La Figure 3 montre la même image après traitement informatique.

Note : cette procédure de détermination de la quantité de bulles sur une surface est fiable dans des conditions d'éclairage contrôlées et ne peut être utilisée comme telle pour des inspections de surface à l'extérieur.

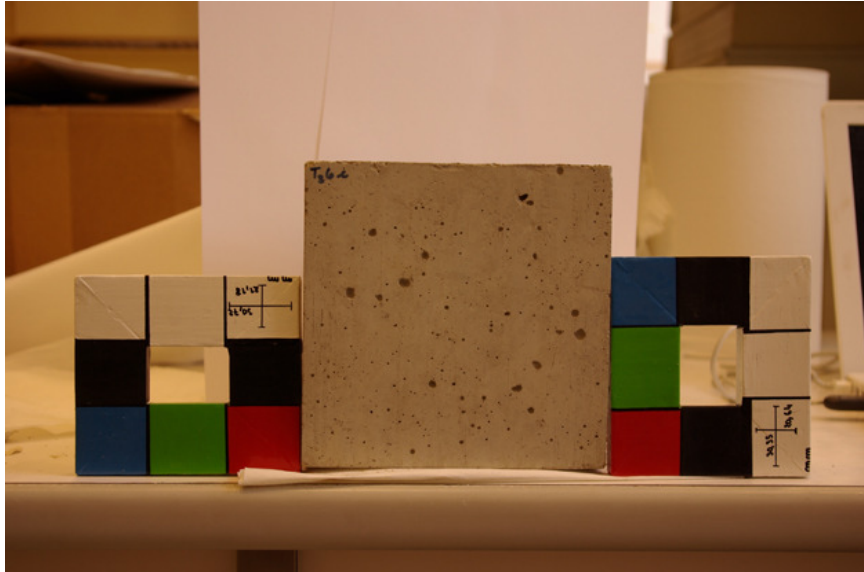


Figure 2. Photographie brute d'une face d'un cube de béton.

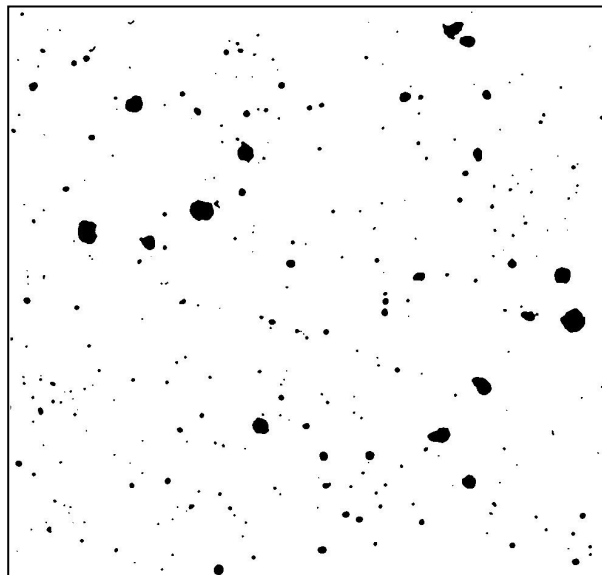


Figure 3. Image de la face du cube de béton après traitement pour mesurer le bullage de surface

3. RÉSULTATS

3.1 Mesure de la couleur des surfaces

Les Figures 4 et 5 montrent l'évolution de la luminance du béton de surface avec le nombre de réutilisations des coffrages OSB et en contreplaqué en fonction du démoulant utilisé. Les Figures 6 et 7 montrent l'évolution de la composante colorimétrique a^* du béton de surface avec le nombre de réutilisations des coffrages OSB et en contreplaqué en fonction du démoulant utilisé. Les Figures 8 et 9 montrent l'évolution de la composante colorimétrique b^* du béton de surface avec le nombre de réutilisations des coffrages OSB et en contreplaqué en fonction du démoulant utilisé.

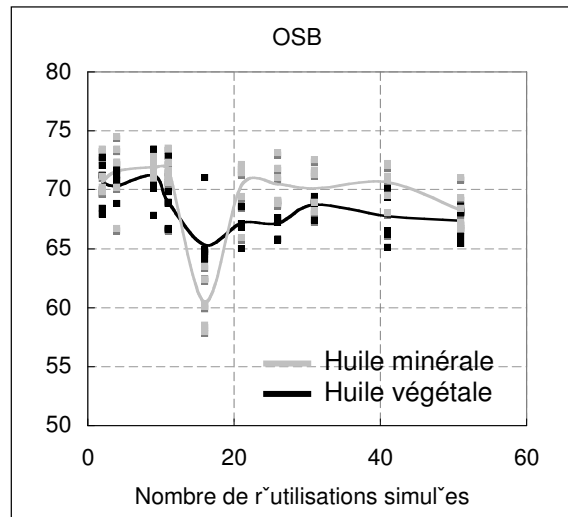


Figure 4. Évolution du L^* du béton de surface avec le nombre de réutilisations des coffrages OSB en fonction du démoulant utilisé.

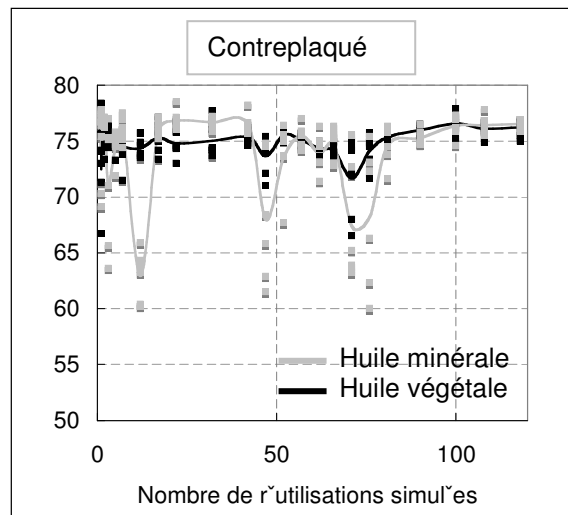


Figure 5. Évolution du L^* du béton du surface avec le nombre de réutilisations des coffrages en contreplaqué en fonction du démoulant utilisé.

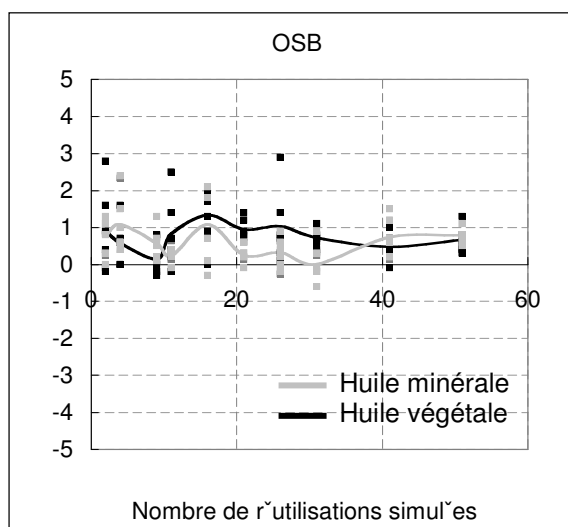


Figure 6. Évolution du a^* du béton de surface avec le nombre de réutilisations des coffrages OSB en fonction du démoulant utilisé.

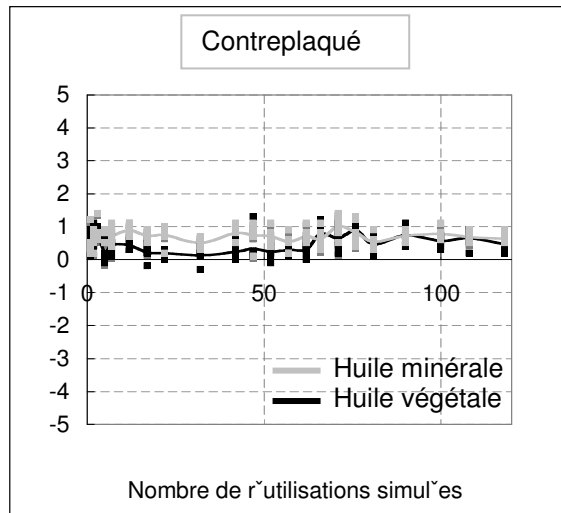


Figure 7. Évolution du a^* du béton de surface avec le nombre de réutilisations des coffrages en contreplaqué en fonction du démoulant utilisé.

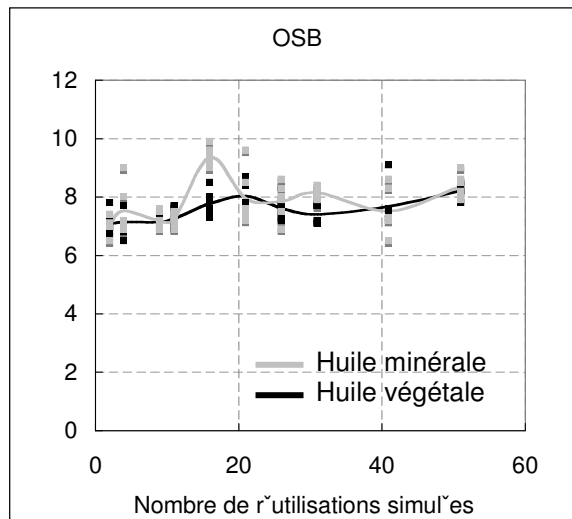


Figure 8. Évolution du b^* du béton de surface avec le nombre de réutilisations des coffrages OSB en fonction du démoulant utilisé.

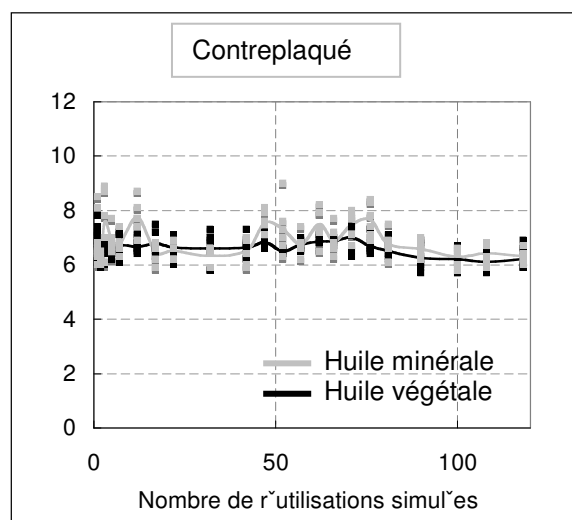


Figure 9. Évolution du b^* du béton de surface avec le nombre de réutilisations des coffrages en contreplaqué en fonction du démoulant utilisé.

Les résultats de mesures colorimétriques sur les parements montrent une grande variabilité des résultats. Pour étudier l'influence du nombre de réutilisations des coffrages sur la couleur des parements, nous avons effectué un test ANOVA à un critère de classification. Ce test statistique permet de comparer les moyennes de plusieurs échantillons par calculs sur les variances.

L'hypothèse nulle H_0 est que le nombre de réutilisations des coffrages n'a pas d'influence sur la couleur des parements. Cela signifie que la moyenne des mesures des coordonnées colorimétriques à chaque échéance de réutilisation ne varie pas significativement. L'hypothèse alternative H_a est que le nombre de réutilisations des coffrages a une influence sur la couleur des parements.

Principe de calcul d'un test ANOVA à un critère de classification.

Calcul du facteur de correction FC : somme de tous les scores mise au carré sur le nombre total de sujet.

$$FC = \frac{(\sum X)^2}{N}$$

Calcul du SC_{total} : somme de toutes les valeurs mises au carré moins le facteur de correction

$$SC_{total} = \sum X^2 - FC$$

Calcul du SC_{trait} : soustraire le FC à la somme des totaux au carré de chaque groupe divisé par l'effectif du groupe

$$SC_{trait} = \sum \left(\frac{T_j^2}{n_j} \right) - FC$$

Calcul du SC_{erreur} :

$$SC_{erreur} = SC_{total} - SC_{trait}$$

Calcul des degrés de liberté : avec N nombre total de sujet, k nombre de groupe

$$dl_{total} = N - 1$$

$$dl_{trait} = k - 1$$

$$dl_{erreur} = N - k$$

Calcul de CM_{trait} et CM_{erreur} :

$$CM_{trait} = \frac{SC_{trait}}{dl_{trait}}$$

$$CM_{erreur} = \frac{SC_{erreur}}{dl_{erreur}}$$

Calcul de F_{obs} :

$$F_{obs} = \frac{CM_{trait}}{CM_{erreur}}$$

Trouver la valeur critique dans la table F : $F_{\alpha; dl_{trait}; dl_{erreur}}$

Si $F_{obs} > F_{\alpha; dl_{trait}; dl_{erreur}}$ alors l'hypothèse H_0 est rejetée,
Si $F_{obs} \leq F_{\alpha; dl_{trait}; dl_{erreur}}$ alors l'hypothèse H_0 est vraie

Les tableaux 2 et 3 résument l'analyse de variance ANOVA à un critère de classification pour déterminer si le nombre de réutilisations des coffrages a une influence sur la teinte des parements, pour les coffrages en contre-plaqué et en bois OSB. Pour le coffrage contre-plaqué, pour chaque démontant, 138 mesures ont été réalisées et 23 échéances de réutilisation ont été simulées : on peut

donc écrire $N=138$, $k=23$. Pour le coffrage OSB, pour chaque démoulant, 60 mesures ont été réalisées et 10 échéances de réutilisation ont été simulées : on peut donc écrire $N=60$, $k=10$.

Tableau 2 : Test ANOVA à un critère de sélection pour le coffrage contre-plaqué.

	Contre-plaqué					
	Huile végétale			Huile minérale		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
FC	774196,4	30,0	6023,2	753336,6	65,0	6523,3
SC _{total}	418,7	13,2	25,6	2759,6	9,6	66,8
SC _{trait}	195,6	6,6	9,7	1867,6	2,6	34,1
SC _{erreur}	223,1	6,6	15,8	891,9	7,0	32,7
dl _{total}	137	137	137	137	137	137
dl _{trait}	22	22	22	22	22	22
dl _{erreur}	115	115	115	115	115	115
CM _{trait}	8,89	0,30	0,44	84,89	0,12	1,55
CM _{erreur}	1,94	0,06	0,14	7,76	0,06	0,28
F _{obs}	4,58	5,24	3,20	10,95	1,98	5,46
F _{α; dl_{trait}; dl_{erreur}}	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65

Tableau 3 : Test ANOVA à un critère de sélection pour le coffrage en bois OSB.

	OSB					
	Huile végétale			Huile minérale		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
FC	281110,5	35,1	3411,1	290705,3	20,4	3673,8
SC _{total}	353,6	30,5	18,6	784,5	22,2	41,1
SC _{trait}	185,2	5,7	8,3	614,3	7,3	25,7
SC _{erreur}	168,5	24,7	10,3	170,1	14,8	15,4
dl _{total}	59	59	59	59	59	59
dl _{trait}	9	9	9	9	9	9
dl _{erreur}	50	50	50	50	50	50
CM _{trait}	20,58	0,64	0,93	68,26	0,81	2,86
CM _{erreur}	3,37	0,49	0,21	3,40	0,30	0,31
F _{obs}	6,11	1,29	4,51	20,06	2,75	9,26
F _{α; dl_{trait}; dl_{erreur}}	2,073	2,073	2,073	2,073	2,073	2,073

Quelque soit le matériau de coffrage et le démoulant, les coordonnées colorimétriques L* et b* varient avec le nombre de réutilisations des coffrages. On peut donc dire que le nombre de réutilisations des coffrages a une influence sur les coordonnées colorimétriques L* et b*.

La coordonnée colorimétrique a* varie avec le nombre de réutilisations des coffrages sauf dans le cas du couple (coffrage OSB, huile minérale).

Il est généralement admis que, dans le cas des bétons, le paramètre L* suffit pour l'analyse colorimétrique des surfaces (Lemaire, 2003). Cette étude montre que le paramètre b* varie aussi. Cela s'explique par la présence du sable dans le mélange de béton. La couche est de surface plus riche en particules fines (fines du sable et ciment). Le sable peut avoir différentes couleurs. Dans le cas étudié, c'est un sable d'apparence jaune qui a été utilisé.

4.2 Mesure du bullage des surfaces

Les Figures 10 et 11 illustrent l'évolution de la proportion de la surface occupée par des bulles de 2 à 15 mm de diamètre avec le nombre de réutilisations des coffrages, en fonction du démoulant utilisé pour les deux types de coffrages.

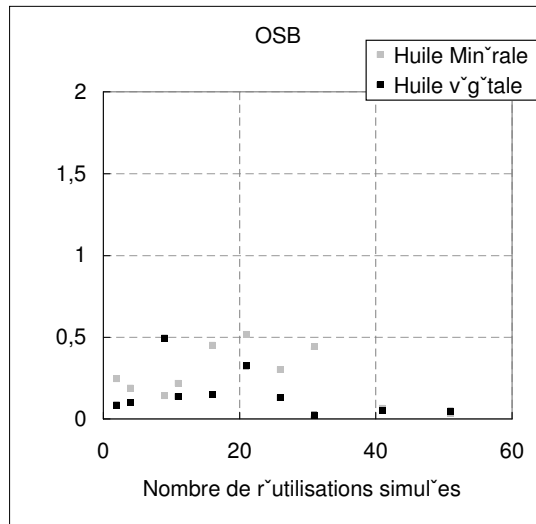


Figure 10. Évolution de la proportion de la surface du béton occupée par des bulles d'air avec le nombre de réutilisations des coffrages OSB en fonction du démolant utilisé.

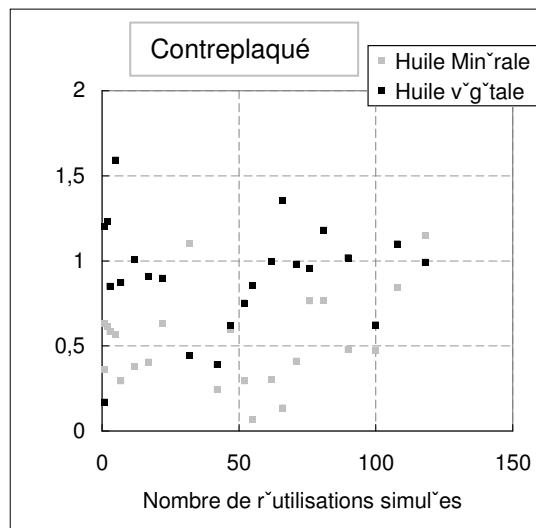


Figure 11. Évolution de la proportion de la surface du béton occupée par des bulles d'air avec le nombre de réutilisations des coffrages en contreplaqué en fonction du démolant utilisé

Ces courbes montrent que le nombre de réutilisations des coffrages n'a clairement pas d'influence sur le bullage des surfaces. Par contre, le matériau de coffrage a une influence sur le bullage de surface.

Afin de déterminer si le matériau de coffrage a effectivement, malgré la variabilité des résultats, une influence sur le bullage de surface des bétons, nous avons calculé le rapport F de Snedecor entre la variance de la proportion de la surface occupée par des bulles d'air des surfaces de béton coulées sur du bois OSB et sur du bois contreplaqué. Ces calculs sont résumés au tableau 4.

L'hypothèse nulle, notée H_0 , est la suivante : la variance du bullage des surfaces coulées sur du bois OSB est la même que celle des surfaces coulées sur du contre-plaqué. L'hypothèse alternative, notée H_1 correspond à des variances différentes.

Ce test montre que la variance du bullage des surfaces de béton coulées avec un bois OSB est différente de celle coulée avec du contreplaqué. Les moyennes de ces deux groupes étant différentes, on peut en déduire que le matériau de coffrage a une influence sur le bullage de surface.

Tableau 4. Calcul du rapport F de Snedecor entre la variance du bullage des surfaces de bétons coulées sur du bois OSB et sur du bois contreplaqué

		B (%Surface)
Contreplaqué	N	46
	Moyenne	0,718
	Variance	0,124
OSB	N	20
	Moyenne	0,206
	Variance	0,026
F		4,78
F _{0,05-ddln-ddld}		2,01

6. CONCLUSIONS

L'étude de l'aspect des parements en béton peut s'avérer parfois difficile car les mesures faites montrent une grande variabilité. L'analyse doit donc passer par une étude statistique afin de s'assurer que les observations faites sont bien réelles et non dues au hasard.

Le nombre de réutilisations des coffrages influence fortement la teinte des parements. Dans l'étude de la couleur des bétons, la coordonnée colorimétrique b* ne doit pas être négligée car elle varie avec le sable utilisé.

La réutilisation des coffrages n'a pas d'influence significative sur le bullage de surface, le facteur déterminant du bullage de surface étant le matériau de coffrage.

7. RÉFÉRENCES

- Apers, J. (2000) *L'aspect extérieur du béton*, Dossier ciment, FEBELCEM.
- Apers, J. et al. (2006) *Technologie du béton*, édition 2006, Groupement Belge du Béton, BELGIQUE.
- CDC-BET Cahier des charges pour les travaux de bétonnage - qualité des parements, LUXEMBOURG
- Lemaire, G. (2003) *Contribution à la maîtrise de la qualité des parements en béton*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, FRANCE.
- Martin, M. (2007) *Étude de la texture de la surface coffrés des parements verticaux en béton*, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, CANADA, Université de Cergy-Pontoise, FRANCE.
- Monks, W.L. (1974) An Investigation into the incidence of colour variation in formed concrete surfaces, *tech. rep.*, *Cement and Concrete Association*.
- Murphy, W.E. (1967) The influence of concrete mix proportion and type of form face on the appearance of concrete, *tech. rep.*, *Cement and Concrete Association*
- Pepe, E. (2007) *Analyse du cycle de vie des coffrages*, Travail de fin d'études (Mst), Université de Liège, BELGIQUE.
- Reading, T. (1985) Effect of release agent used on plywood forms, *Concrete International*, 15-22.
- Schmidt-Morsbach, J. (1981) Concrete surfaces and the formwork face: DIN 18 217 as a basis for planning, part ii, *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, 158-164.