

Influence des paramètres de formulation des pâtes ciments sur les aspects de parements

E. CHUTA^a, J. JEONG^b

a.b. Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, École spéciale des travaux publics, du bâtiment et de l'industrie, echuta@estp-paris.eu, jjeong@estp-paris.eu

Résumé :

Les principaux paramètres influençant la variation de la couleur (luminance= L^) dans les surfaces des pâtes de ciments (parement) ont été identifiés, tel que la variation du rapport eau sur ciment (E/C) et la rugosité de surface. Dans la littérature, les auteurs ont des avis divergents à propos de l'influence du rapport E/C et de la rugosité de surface sur la luminance dans les matériaux cimentaires. Donc, nous avons réalisé des essais expérimentaux pour déterminer la relation qui existe entre la luminance de surface des pâtes et le rapport E/C, d'une part, et la relation entre la luminance et la rugosité, d'autre part. Les résultats sont ensuite utilisés pour réaliser des simulations numériques afin de déterminer l'impact de la rhéologie de pâtes de ciments frais sur l'état de surface final. En effet, nous avons constaté que la formulation est l'un des facteurs déterminant la rhéologie des pâtes permettant ainsi de prédire l'état de surface à l'état durci. Cet état de surface peut être mesuré en termes de luminance. Cet article est composé en 3 parties : Dans une première partie, nous allons identifier les principaux défauts de parements et étudier la rhéologie du béton frais. Dans la deuxième partie, nous allons présenter les résultats des essais expérimentaux réalisés pour déterminer la relation existante entre la luminance et la rugosité, pour ensuite étudier le comportement des pâtes en utilisant un rhéomètre afin de déterminer la viscosité et le seuil de cisaillement. Finalement, nous allons utiliser les données expérimentales obtenus pour réaliser les simulations numériques via le logiciel COMSOL multiphysics avec « Computational Fluid Dynamics » (CFD) en utilisant la loi de Bingham Papanastasiou pour étudier le comportement de l'écoulement de pâtes frais.*

Mots clefs : Pâte de ciment frais, rhéologie, modélisation numérique, luminance, rugosité

1 Introduction

Le parement, est la face d'un élément de construction conçue pour rester apparente, qui peut faire l'objet de nombreux traitements mécaniques ou chimiques. Parmi les défauts d'aspect de surfaces étudiés dans la littérature, on distingue ceux qui sont liés à la teinte (couleur). Le but de notre travail est de déterminer la relation entre la luminance de surface de matériaux cimentaires et son état de surface (rugosité). Ainsi que de déterminer l'état de surface durci de la pâte du ciment par le biais de la simulation numérique en utilisant des paramètres rhéologiques issus de l'expérience.

1.1. Facteurs déterminant la teinte de parements

L'aspect perçu du parement résulte de l'action de la lumière sur le béton et de la perception de l'œil de l'observateur (Fig. 1). Après avoir consulté plusieurs références bibliographiques nous avons pu identifier les principaux paramètres influençant sur la variation de la couleur du béton et ses effets selon les zones claires et sombres. Selon Izoret [1], Fig. 1-droite, le rapport E/C a une influence sur la teinte de surface du béton. Quand le rapport E/C est grand la surface de béton est plus sombre. Le même auteur a trouvé que la luminance de surface de béton est grande quand la rugosité de la surface de béton est importante. Mais ces résultats sont divergents par rapport les résultats trouvés dans [2][3][4]. **Le parement du béton, est le résultat de l'interface béton/huile/coffrage. Ainsi, selon la littérature, la surface du béton est le reflet de la surface de coffrage et du type de matériau de coffrage utilisée. Par exemple, un coffrage absorbant (bois) donne une surface plus foncé et mate par rapport à une surface non absorbante donnant une surface grise très claire [3][4]. Le type et la quantité de produit de démoulage, et la composition du béton ont aussi une importante influence sur l'aspect de la surface du béton. Dans notre cas, nous allons se focaliser sur l'influence de la composition de pâte de ciment sur l'aspect de surface en faisant varier le rapport E/C et en considérant les autres paramètres tel que le type d'huile et de coffrage constante.**



Figure 1. Aspect de parements de béton

1.2. Rhéologie du béton frais

Le béton frais est un matériau multiphasique considéré comme le mélange d'un fluide non-Newtonien (pâte du ciment + des granulats) avec de l'air. Le fluide non-Newtonien est caractérisé par une contrainte de cisaillement τ_0 . Quand les contraintes appliquées au fluide non-Newtonien ne dépassent pas la contrainte τ_0 , le fluide se comporte comme un matériau rigide indéformable. Autrement, le fluide s'écoule. La rhéologie du béton dépend de sa formulation (nature et granulométrie de granulats, rapport E/C ou l'effet de différentes additions des constituants du béton). Pour décrire le comportement du béton, plusieurs modèles semi-empiriques ont été développés pour trouver une relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de déformation. Le modèle le plus répandu est celui de Bingham [5]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad [1]$$

Avec : $\tau > \tau_0$ (Pa) : Contrainte de cisaillement, τ_0 (Pa) : Seuil de cisaillement, μ (Pa.s) : Viscosité constante et $\dot{\gamma}$: Taux de déformation.

Papanastasiou (1987), a proposé un modèle basé sur la fonction exponentielle afin de régulariser le modèle de Bingham en introduisant un paramètre de contrôle m . Ce modèle est appelé généralement le modèle de Bingham-Papanastasiou [6], il s'exprime comme suit:

$$\tau = \tau_0 [1 - \exp(m\dot{\gamma})] + \dot{\gamma}\mu \quad [2]$$

Avec m : Paramètre de régularisation/contrôle (si $m=0$ fluide newtonien, si $m \rightarrow \infty$, fluide Bingham idéal) Voir fig. 2. La relation entre la viscosité apparente η (Pa.s) et le taux de déformation $\dot{\gamma}$ peut être déduite :

$$\eta = \mu + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} [1 - \exp(m\dot{\gamma})] \quad [3]$$

Nous allons appliquer l'équation 3 pour simuler l'écoulement de pâte. Mais avant cela, nous allons réaliser des essais expérimentaux pour déterminer la relation entre la luminance et la rugosité en fonction de rapport E/C, ainsi que pour déterminer la viscosité et le seuil de cisaillement.

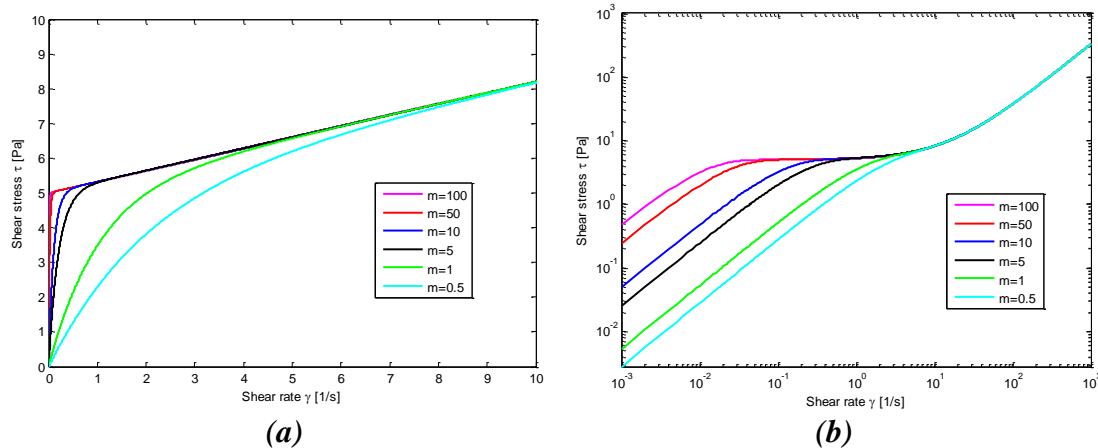


Figure 2. Comportement d'un fluide non newtonien avec seuil selon la loi de Bingham Papanastasiou selon différentes valeurs de m : (a) linéaire et (b) logarithmique

2 Partie expérimentale

2.1 Luminance et rugosité

Pour cette démarche, nous avons préparé plusieurs pâtes de ciments avec différents rapport E/C : 0.30, 0.35, 0.40, 0.45 et 0.50. Le ciment utilisé pour faire ces essais est de type CEM I. L'objectif de cette partie est de déterminer la variation de la luminance en fonction du rapport E/C (Fig. 3a) et de la rugosité de la surface durcie des pâtes (Fig.3b). La luminance est mesurée à 28 jours de durcissement après le démoulage en utilisant le spectrocromimètre Minolta CM-508i. Tandis que, la rugosité est mesurée en utilisant le microscope numérique Keyence VHX-2000E. Les valeurs de la luminance varient entre 0 (noir) et 100 (blanc). **Tandis que pour la rugosité nous avons utilisé le terme de coefficient de surface développé (CS), exprimé en pourcentage, qui est le quotient entre la surface mesurée (S_m) et la surface géométrique (S_g) multiplié par 100%.**

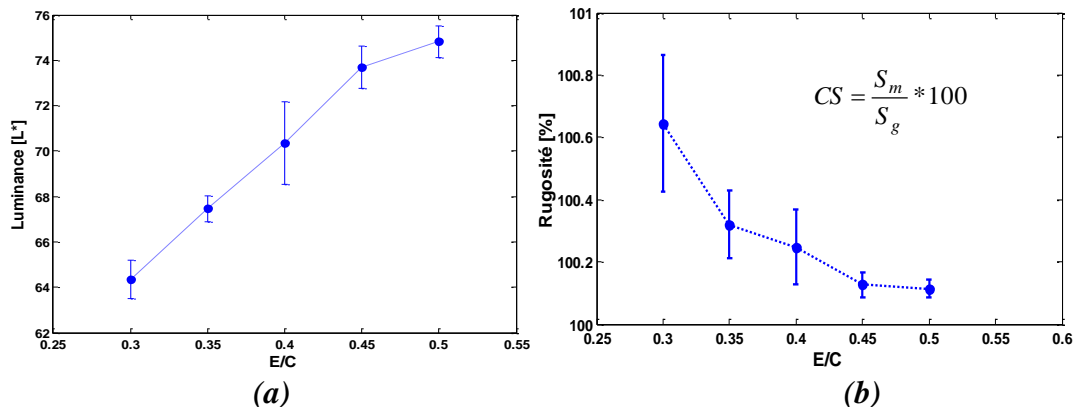


Figure 3. Variation de la luminance en fonction de rapport E/C (a) et de la rugosité en fonction d'E/C (b)

E/C Pâte	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
Masse volumique (Kg/m ³)	2134	2037	1962	1859	1822	1764	1712

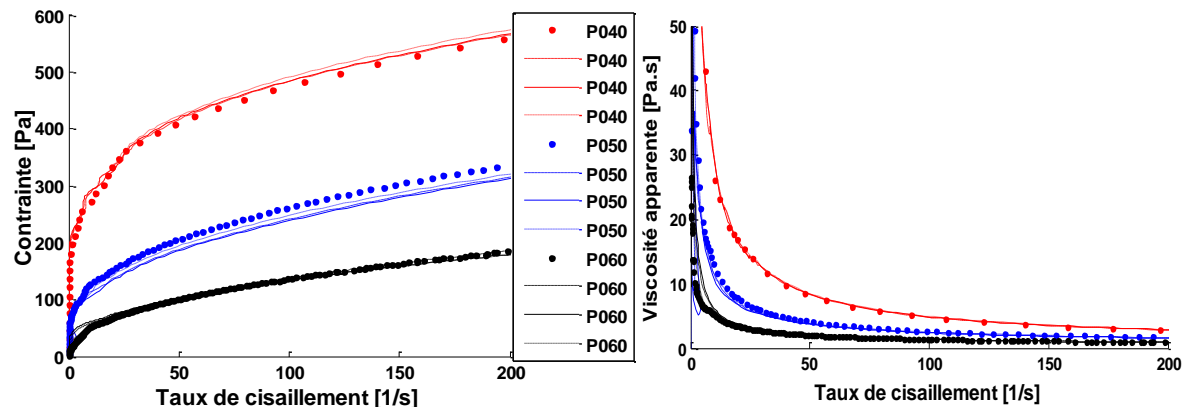
Tableau 1. Masses volumiques des pâtes selon son rapport E/C

D'après la figure 3, l'augmentation du rapport E/C entraîne une augmentation de la luminance de la surface de pâtes à l'état durci. Au sens inverse, l'augmentation de la rugosité de la surface entraîne une diminution des luminances. D'après le tableau 1, nous avons constaté que la masse volumique des pâtes diminue avec l'augmentation du rapport E/C. A partir de nos résultats nous pouvons conclure :

- La variation du rapport E/C a une influence sur la luminance de la surface de pâtes de ciment à l'état durci.
- La variation de la luminance est directement proportionnelle au rapport E/C.
- Il y a une relation inverse entre luminance et rugosité.
- La masse volumique diminue quand le rapport E/C augmente.

2.2 Rhéologie des pâtes

L'objectif de cette partie est de déterminer la viscosité et le seuil de cisaillement des pâtes de ciment. Nous avons utilisé un rhéomètre à rotation «RheolabQC» pour dessiner les courbes de contrainte de cisaillement (τ) en fonction du taux de déformation ($\dot{\gamma}$). Pour cette démarche, nous avons préparé des échantillons des pâtes de ciments CEM I avec différents rapports E/C de 0.40, 0.50 et 0.60. La géométrie à ailettes est utilisée pour effectuer les mesures.

**Figure 3.** Tracé de différentes courbes rhéologiques des pâtes selon différents rapport E/C : Seuil (gauche) et viscosité apparente (droite)

Le comportement rhéologique de pâtes est présenté dans la figure 3. Ce comportement est variable en fonction du rapport E/C. Le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent avec l'augmentation du rapport E/C (Tableau 2).

E/C	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	m
0.40	365	1	0.2
0.50	160	0.8	0.1
0.60	83	0.48	0.06

Tableau 2. Propriétés rhéologiques des pâtes selon leur rapport E/C avec un taux de cisaillement maximum de 200 s⁻¹

3 Simulation de la rhéologie

3.1 Introduction

Pour cette partie, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysic avec le module CFD pour simuler l'écoulement de pâtes dans un moule (bétonnage). Nous considérons la pâte comme un fluide homogène de comportement non-Newtonien où la loi de Bingham-Papanastasiou est adoptée pour sa modélisation. La pâte s'écoule dans un moule métallique de dimensions : 4 x 4 x 16 cm³.

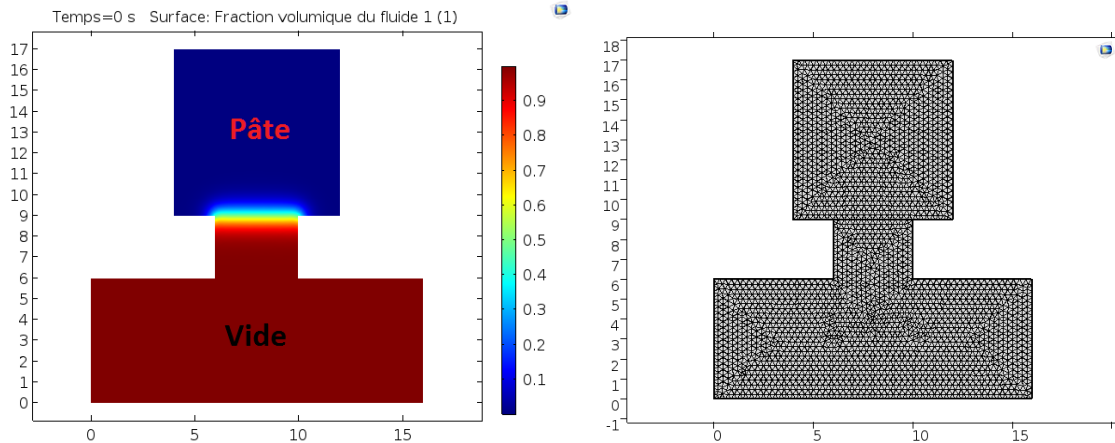
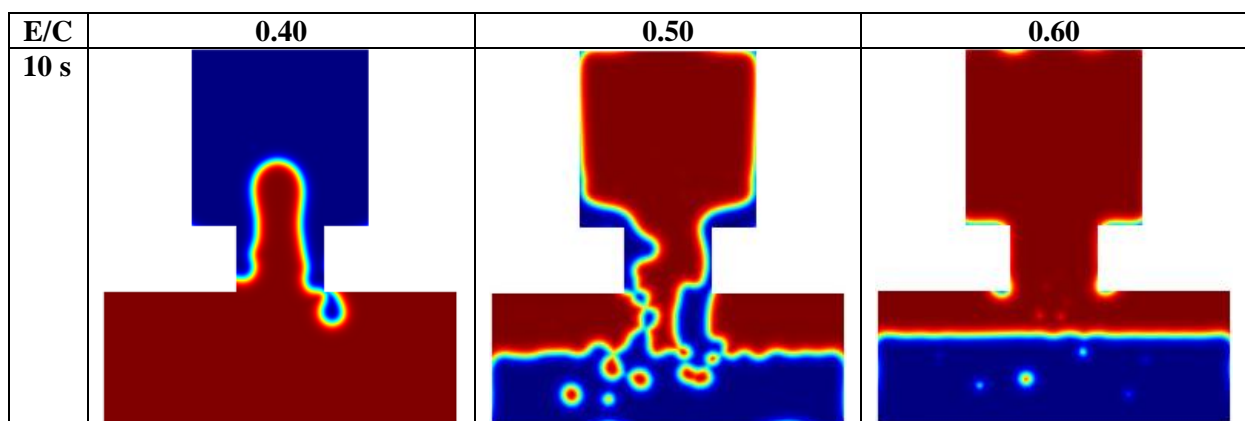


Figure 4. Proposition de model monophasique pour la simulation : Géométrie (Gauche) et son maillage(Droite)

La simulation a été lancée dans le réseau Cloud de l'École spéciale des travaux publics, du bâtiment et de l'industrie, réseau qui a une mémoire RAM de 128 Gb et 16 processeurs.

3.2 Effet de la rhéologie sur l'aspect de surface

Dans cette partie, nous avons simulé les effets des propriétés rhéologiques sur le temps d'écoulement et sur l'aspect final de la partie supérieure des produits de bétonnage. Nous avons utilisé les valeurs obtenues dans la partie expérimentale décrite dans le tableau 2, en utilisant la loi de Bingham Papanastasiou. Les résultats sont montrés dans la figure 6.



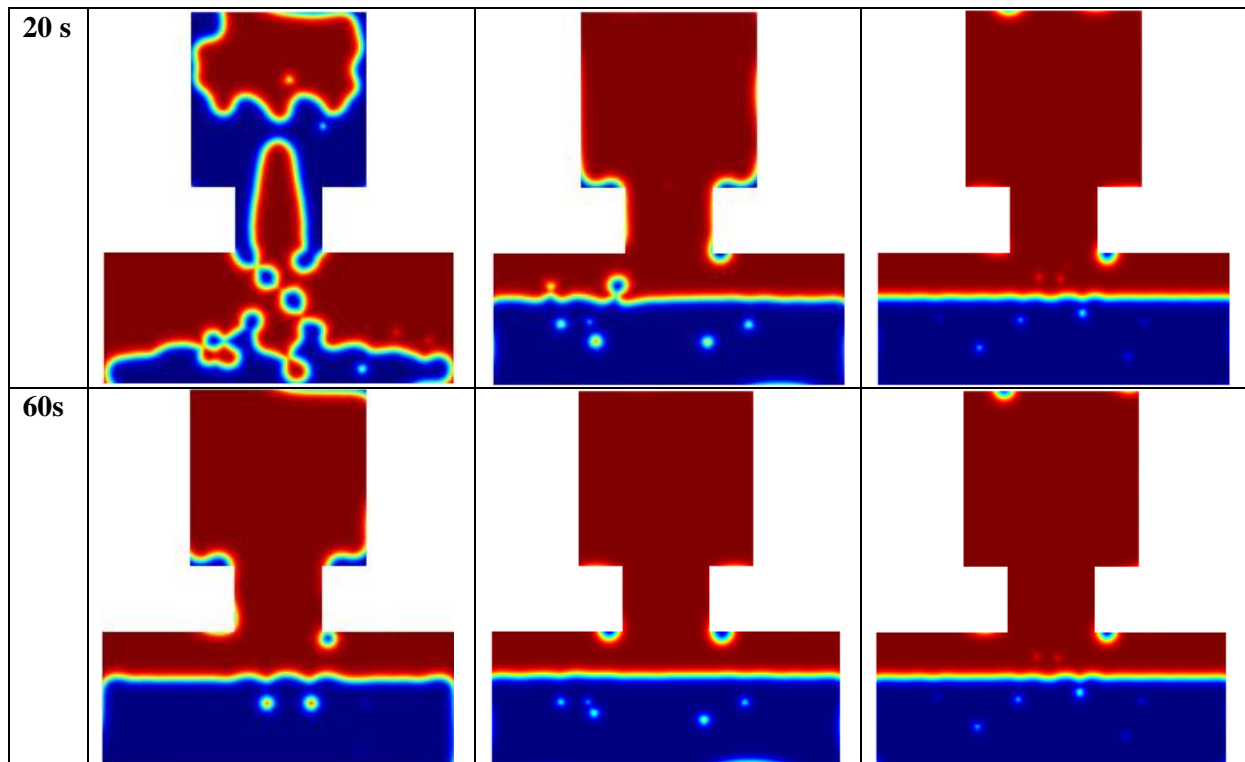


Figure 5. *Écoulement des pâtes selon leurs propriétés rhéologiques*

A partir des résultats obtenus, nous avons constaté que la variation du rapport E/C a une influence sur le temps d'écoulement et sur l'état de surface final du produit bétonné. Plus le rapport E/C est important, plus la pâte s'écoule rapidement. L'augmentation du rapport E/C permet la génération de surfaces moins rugueuses (plus lisses).

3.4 Relation entre la rugosité, la luminance et la rhéologie des pâtes.

Après atteindre l'état stable de l'écoulement ou la quantité de pâte est totalement versée dans le moule. Nous constatons que la rugosité à la surface de la pâte est plus importante quand sa masse volumique est grande.

D'après nos résultats expérimentaux, nous observons que la variation de la luminance est proportionnelle au rapport E/C et inversement proportionnelle à la rugosité. Nous observons aussi que la densité de mortier est plus importante quand la quantité d'eau dans sa formulation est moins importante, ainsi que la luminance est plus importante pour les pâtes légères. Autrement dit, la rugosité de pâtes lourdes est plus importante par rapport à celles légères. Ces observations correspondent à la simulation numérique.

3.5 Perspectives

Nous avons trouvé un rapport entre la rhéologie et l'état final de surfaces de pâtes. Comme perspective, nous allons réaliser une simulation numérique d'écoulement diphasique de mortier, afin de pouvoir déterminer son comportement et identifier l'aspect final de sa surface lié à la présence des granulats.

Références

- [1] L. Izoret. Caractérisation de la teinte des parements, Recherche associative ATILH, 1992.
- [2] Lallement, Hétérogénéités de teinte des parements en béton: caractérisation et identification des mécanismes, Thèse Université de Cergy Pontoise 2001
- [3] G. Lemaire, Contribution à la maîtrise de la qualité des parements de béton, Thèse Université Toulouse 2003.
- [4] M. Martin, Etude de la texture de la surface coffrée des parements verticaux en béton, Thèse Université de Cergy Pontoise 2007.
- [5] E. Bingham fluidity and plasticity. 1922
- [6] Evan Mitsoulins, Flows of viscoplastic materials: Models and computations, Rheology reviews 2007. British Society of Rheology.