
Caractérisation de la surface de coffrage par microscopie interférométrique

Evaluation des efforts mis en jeu au décoffrage

Chadfeau Calypso¹, Belhaj Essia¹, Fond Christophe², Feugeas Françoise¹

¹ ICube, UMR CNRS 7357, INSA de Strasbourg, 24 Boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg, France, calypso.chadfeau@insa-strasbourg.fr, essia.belhaj@insa-strasbourg.fr, françoise.feugeas@insa-strasbourg.fr

² ICube, UMR CNRS 7357, Université de Strasbourg, 72 Route du Rhin, F-67400 Illkirch, France, christophe.fond@unistra.fr

RÉSUMÉ

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du projet national à Fond Unique Interministériel, nommé ERGOFORM (ERGOnomic FORMwork - Système de coffrage autostable diminuant la pénibilité de chantier), qui vise à mettre au point un procédé de coffrage innovant. Il étudie la pertinence d'une nouvelle solution de traitement de l'acier qui devra favoriser le décoffrage, avec au moins les mêmes performances obtenues par l'application d'huile de décoffrage. Tenter d'approfondir les connaissances sur les phénomènes à l'origine de l'adhérence entre béton et coffrage constitue l'enjeu de ce travail. Dans le but de caractériser les surfaces des matériaux en présence, une analyse par microscopie interférométrique est effectuée sur des surfaces coffrantes. La rugosité moyenne surfacique, représentée par la moyenne arithmétique des paramètres Sa vaut 5µm. De plus, une procédure originale d'essai sollicitant l'interface béton-surface coffrante à l'échelle macroscopique est mise au point. Celle-ci permet d'évaluer de manière quantitative les efforts mis en jeu au décoffrage de l'interface béton-surface coffrante.

ABSTRACT

The work reported is related with the FUI national project, known as ERGOFORM (ERGOnomic FORMwork - Steady-self formwork reducing harsh working conditions) whose aim is to develop an innovative formwork. The relevance of a new solution of steel treatment is studied. Indeed, this solution has to improve demoulding as much as a demoulding agent does, or even better. In order to deeper understand adhesion phenomena between concrete and formwork, a process of formwork surface characterization is completed on the formwork surfaces thanks to interferometric microscopy. The arithmetic average of the Sa parameter is 5 µm. In addition, the rupture of concrete-formwork interface is evaluated by means of an original device especially designed for this work. This macroscopic method can be considered such as an objective evaluation of demoulding performances of the formworks.

MOTS-CLÉS : coffrage, béton, rugosité, adhésion, adhérence.

KEY WORDS : formwork, concrete, roughness, adhesion.

1 Introduction

Le béton est aujourd'hui un matériau de construction incontournable. Les possibilités esthétiques et techniques offertes par l'emploi du béton apportent une totale liberté de création de formes, de textures et de couleurs aux ouvrages. Les dispositions prises lors du coffrage, le choix du système de coffrage et les traitements appliqués conditionnent la qualité de parement finale [LEM 05]. Outre le coffrage, l'utilisation et le choix d'un agent de démoulage va influencer l'aspect final du parement [MAR 07] [LIB 94] [GUE 10].

Le travail présenté étudie l'action d'une solution de traitement d'acier innovante visant à réduire, voire supprimer, l'utilisation des huiles de décoffrage. Il s'inscrit dans le cadre du projet national FUI 18 ERGOFORM. Cette solution, élaborée en collaboration avec les partenaires du projet, se doit de garantir une performance au décoffrage au moins identique à celle obtenue avec l'application des huiles, qui ont pour objectif de faciliter le démoulage. En effet, lors du coulage du béton, des liaisons se créent entre les matériaux en contact. Ce travail s'intéresse ainsi à l'interaction béton-peau coffrante au moment des phases de coffrage-décoffrage. Il se concentre sur la compréhension des phénomènes qui aboutissent à l'adhésion entre béton et coffrage. Différents auteurs ont étudié le phénomène d'adhésion entre béton et coffrage. Courard et al. [COU 98] [COU 11] classent les phénomènes en deux types : l'adhésion spécifique et l'adhésion mécanique. La première regroupe les aspects thermodynamiques et l'action des forces intramoléculaires et intermoléculaires, la seconde s'attache à l'observation de la topographie de surface du matériau. Cette étude concerne l'adhésion mécanique entre béton et coffrage analysée selon deux échelles: microscopique et macroscopique. Une analyse de la surface de la peau coffrante par microscopie interférométrique est proposée afin d'appréhender l'influence de la topographie de surface du coffrage sur l'adhésion avec le béton. Une procédure originale d'essai permettant l'évaluation des efforts mis en jeu au décoffrage est développée.

2 Matériels et Méthodes

2.1 Méthodes

2.1.1 Rugosité de surface

La rugosité des plaques d'acier sans traitement est mesurée avec un microscope interférométrique Bruker Contour GT-K® dont la résolution latérale est de 2,2 µm et la résolution verticale est de 5 nm. Les surfaces mesurées présentent les dimensions suivantes : 1264 µm * 948 µm. Pour chaque plaque, 24 mesures sont effectuées, leur localisation sur la plaque est représentée sur la figure 1. Cette procédure est appliquée pour quatre plaques identiques ce qui donne 96 surfaces analysées et comparées.

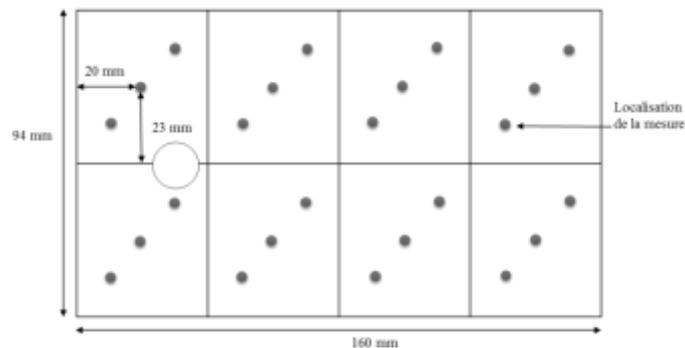


Figure 1. Localisation des mesures de rugosité sur surface coffrante en acier.

La norme ISO 25178-2 de 2012 spécifie les paramètres d'états de surface, notamment S_a , le paramètre d'amplitude. S_a correspond à l'écart moyen arithmétique ou rugosité arithmétique moyenne déterminé grâce à l'équation [1].

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| dx dy \quad [1]$$

Où $z(x,y)$ est la valeur absolue obtenue par lecture des données surfaciques des zones analysées, notées A (environ 300 000 valeurs).

La procédure de test proposée vise à solliciter l'interface béton/coffrage en cisaillement. La représentation schématique du montage est présentée figure 2.

Deux plaques d'acier sont disposées sur deux faces opposées du coffrage (figure 2). Sur les deux faces restantes, sont glissées les plaques de polystyrène. Le mortier est coulé dans des coffrages cubiques de dimensions 100 mm * 100 mm * 100 mm. Les éprouvettes sont installées en chambre humide pendant 24h.

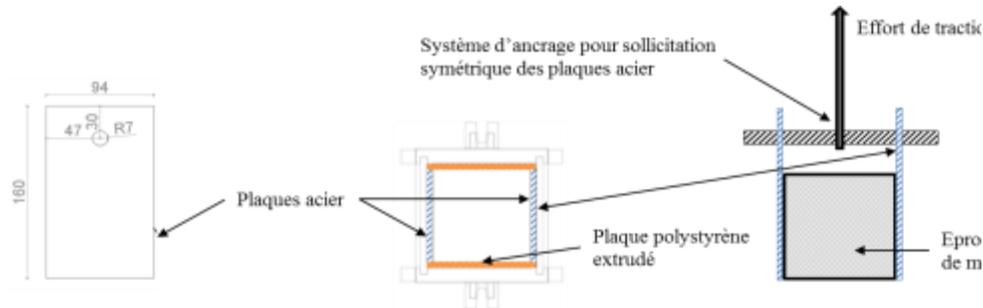


Figure 2. Dispositif expérimental de décoffrage.

Après démoulage des éprouvettes, ces dernières sont installées dans un bâti adapté à la machine de traction spécifiquement pour cet essai. La machine de traction est une SHIMADZU Autographh AG-X Series®, d'une capacité de charge de 100kN, et associée au logiciel d'acquisition de données TRAPEZIUM®. Les essais sont réalisés 24h après la mise en chambre humide des éprouvettes. Pour chacune des éprouvettes, les plaques d'acier sont sollicitées symétriquement et simultanément au moyen d'un système d'ancrage logé au niveau des usinages circulaires (figure 2). La vitesse de chargement est égale à 0,5 mm.min⁻¹.

2.2 Matériel

L'acier est de même composition que celui utilisé pour la réalisation des coffrages du projet ERGOFORM : acier inoxydable ferritique à 17% de chrome. Les plaques d'acier sont toutes de même dimensions (160*94*5 mm³, figure 2).

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes de mortier. Le ciment est un CEM II /BS 42.5 N HEMING HOLCIM. La composition des mortiers est la suivante : 450 ± 2 g de ciment, 1350 ± 5 g de sable normalisé et 225 ± 1 g d'eau potable (norme NF EN 196-1). La mise en œuvre est adaptée de la norme : éprouvette coulée en trois couches d'épaisseur égale, piquage 25 fois et 10 chocs pour chaque couche. Elle est scrupuleusement reproduite pour chaque échantillon.

3 Résultats et discussion

3.1 Rugosité de surface

La moyenne arithmétique avec 96 mesures du paramètre d'amplitude Sa vaut 5,6 ± 0,2 µm pour des surfaces analysées de 1,2mm².

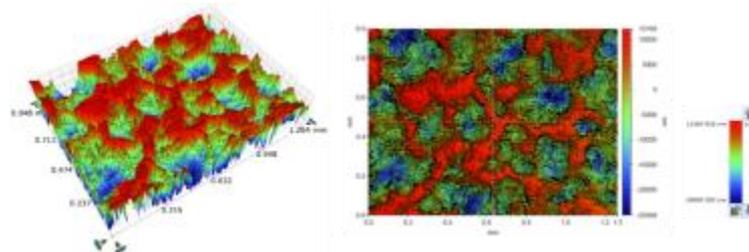


Figure 3. Exemple de surface d'acier analysée au microscope interférométrique.

L'adhésion mécanique entre béton et coffrage dépend des sites d'ancrage entre deux surfaces : la plaque d'acier et le mortier dans notre configuration d'essai. En effet, il a été choisi de travailler avec du mortier plutôt que du béton pour des questions de taille des moules utilisés. Ces essais sont destinés à permettre une comparaison objective de différentes qualités de surface de peaux coffrantes analysée selon deux échelles: microscopique et macroscopique mais ne sont pas reproductifs de ce qui se passe sur chantier à l'échelle 1.

A l'échelle du micromètre, le paramètre de rugosité surfacique S_a permet de caractériser la surface des plaques [BEN 16]. D'autres paramètres, notamment les paramètres hybrides introduisant la notion de surface développée comme le paramètre S_{dr} caractérisent plus finement la surface. En effet, le paramètre S_{dr} rapporte le ratio de la surface interfaciale développée. Dans un premier temps, le paramètre S_a est indispensable et rapidement accessible pour comparer les différents états de surfaces des coffrages avec les résultats de la littérature. Un matériau plus rugueux ayant un S_a plus élevé offre de plus nombreux sites d'ancrage micrométriques entre le ciment et l'acier et influence l'adhésion mécanique entre eux. Une abondante littérature traite de ces relations rugosité/adhérence et ancrage mécanique dans des applications impliquant notamment des composites [CHA 12].

3.2 Effort mis en jeu au décoffrage

Pour une vitesse de chargement de $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, la contrainte tangentielle moyenne atteinte est de l'ordre de $0,5 \text{ MPa}$. La figure 4 présente une courbe type.

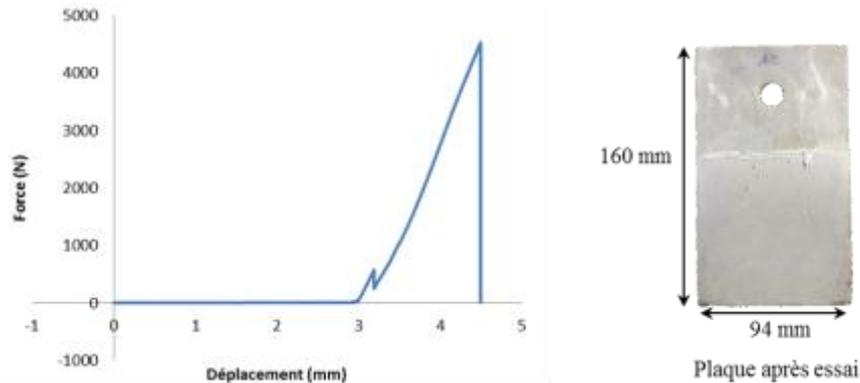


Figure 4. Courbe type force-déplacement interface coffrage/mortier. Faciès d'une plaque après essai.

Les courbes pour chaque essai réalisé présentent une allure similaire et reproductible. Elles affichent une phase linéaire qui représente principalement l'élasticité de l'ensemble du montage. En effet, aucune non linéarité de type endommagement n'est visible à l'échelle de la courbe. S'il y a endommagement préalable avant ruine de « l'assemblage », il serait donc de faible expression et/ou probablement confiné dans un petit volume. La courbe se termine par la rupture de « l'assemblage », c'est-à-dire la séparation brusque entre le mortier et la plaque d'acier. La rupture semble être de type cohésif puisque une couche cimentaire d'épaisseur hétérogène est observée sur la plaque (figure 4).

Il n'existe à notre connaissance aucun essai de ce type qui permette d'évaluer la force maximale qui doit être appliquée sur une banche pour décoffrer un mur par exemple. En effet, les travaux sur les phénomènes d'adhésion proviennent essentiellement du domaine du collage structural. D'après Cognard [COG 00], « la tenue d'un collage est mesurée par un essai de séparation, la force ou l'énergie correspondante dépend de la géométrie de l'assemblage, de l'appareil de mesure et des conditions expérimentales, nous l'appellerons *force* – ou *énergie* – d'adhérence ». Pour ce travail, la contrainte maximale à la rupture en mode II est retenue. En Génie Civil, l'adhérence armature/béton a été plus souvent étudiée. Il existe un essai normalisé (NF EN ISO 4624) qui fait également apparaître une zone linéaire. D'autres essais plus spécifiques s'intéressent à l'adhérence des connexions poutres mixtes aciers/bétons [THO 05] et mettent également en évidence une zone linéaire correspondant à l'adhérence élastique et c'est la force de rupture de celle-ci qui est enregistrée comme valeur limite à ne pas atteindre.

4 Conclusion

Des essais ayant pour but d'établir une méthodologie garantissant un classement quantitatif objectif des différents traitements de surfaces d'acier de banches ont été mis au point.

Une procédure originale est proposée permettant de mettre en évidence l'influence de l'état de surface à l'échelle micrométrique sur l'ancrage mécanique et l'adhérence mortier/acier de différents types de coffrage. Les essais réalisés avec le microscope interférométrique permettent de caractériser la topographie et la rugosité de surface. Les essais mécaniques permettent d'évaluer les efforts mis en jeu au décoffrage d'une manière reproductible.

5 Remerciements

Ce travail est effectué dans le cadre du projet FUI 18 ERGOFORM qui rassemble quatre partenaires : les entreprises Hussor et Lormac, ainsi que deux laboratoires de recherche, le Laboratoire de Photochimie et d'Ingénierie Macromoléculaire (LPIM) et le laboratoire des sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie (ICube). Les auteurs remercient les partenaires du projet, les pôles de compétitivité Fibres Energivie et Matériaux qui ont labellisé le projet ainsi que la région Alsace Champagne-Ardenne Lorraine, l'EuroMétropole de Strasbourg et la Banque Publique d'Investissement France.

6 Bibliographie

- [LEM 05] LEMAIRE G., ESCADEILLAS G., RINGOT E., « Concrete surfaces using an image analysis process », *Construction and Building Materials*, vol. 19, n 8, 2005, p. 604-611.
- [MAR 07] MARTIN M., Etude de la texture de la surface coffrée des parements verticaux en béton, Thèse de doctorat, Université de Laval, Québec, 2007.
- [LIB 14] LIBESSART L., DJELAL C., DE CARO P., « Influence of the type of release oil on steel formwork corrosion and facing aesthetics », *Construction and Building Materials*, vol. 68, 2014, p. 391-401.
- [GUE 10] GUEIT E., DARQUE-CERETTI E., TINTILLIER P., HORGNIÉS M., « Influence de tensioactifs sur l'hydratation du ciment à l'interface béton/coffrage », *Article de colloque MATERIAUX 2010*, Nantes, 18-22 octobre 2010.
- [COU 98] COURARD L., Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation. Appétence et adhérence: cause et effet d'une liaison, Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 1998.
- [COU 11] COURARD L., MICHEL F., Martin M., « The evaluation of the surface free energy of liquids and solids in concrete technology », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n 1, 2011, p. 260-266.
- [BEN 16] BEN AHMED K., Etude de l'encrassement biologique de matériaux cimentaires en eau de rivière. Analyse de l'influence des paramètres de surface des pâtes cimentaires, Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 2016.
- [CHA 12] CHATAIGNIER S., GAGNON A., QUIERTANT M., BENZARTI K., AUBAGNAC C., « Renforcement par composites collés des structures métalliques de génie civil: durabilité du transfert des efforts à l'interface composite/métal », *Revue des composites et des matériaux avancés*, vol. 22, n 2, 2012, p. 155-170.
- [COG 00] COGNARD J., *Science et technologie du collage*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000.
- [THO 05] THOMANN M., Connexions par adhérence pour les ponts mixtes acier-béton, Thèse de doctorat, Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, EPFL, Lausanne, 2015.