



HAL
open science

Influence d'un bioadjuvant sur l'adhésion du ciment sur parois coffrantes et évaluation de l'effet de la rugosité des parois coffrantes

Calypso Chadfeau, Sayed Hashim Mohseni, Safiullah Omary, Vincent Steiner, Essia Belhaj, Christophe Fond, Françoise Feugeas

► To cite this version:

Calypso Chadfeau, Sayed Hashim Mohseni, Safiullah Omary, Vincent Steiner, Essia Belhaj, et al.. Influence d'un bioadjuvant sur l'adhésion du ciment sur parois coffrantes et évaluation de l'effet de la rugosité des parois coffrantes. *Matériaux & Techniques*, 2020, 108 (3), pp.301. 10.1051/mat-tech/2020031 . hal-03014434

HAL Id: hal-03014434

<https://hal.science/hal-03014434>

Submitted on 19 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Influence d'un bioadjuvant sur l'adhésion du ciment sur parois coffrantes et évaluation de l'effet de la rugosité des parois coffrantes

Calypso Chadfeau^{1,*}, Sayed Hashim Mohseni¹, Safiullah Omary¹, Vincent Steiner, Essia Belhaj¹,
Christophe Fond², et Françoise Feugeas¹

¹ ICube UMR 7357, INSA Strasbourg, Université de Strasbourg, 67084 Strasbourg, France

² ICube UMR 7357, Université de Strasbourg, 67400 Illkirch, France

Reçu le 16 décembre 2019 / Accepté le 15 septembre 2020

Résumé. L'objectif de ce travail est de comprendre comment l'adhésion entre le ciment et le coffrage est influencée par la morphologie de la surface du coffrage et l'ajout d'un bioadjuvant. L'ancrage mécanique de la pâte cimentaire est en effet lié à la rugosité de surface du coffrage. Une procédure de caractérisation morphologique des surfaces en contact, coffrage et ciment, est développée par microscopie interférométrique. Elle permet de retenir une échelle d'observation pour laquelle les valeurs des paramètres d'états de surface S_a , S_q , S_{dr} , V_{vc} et V_{vv} , sont représentatifs de la morphologie de surface. Trois états de surface de coffrage différents sont obtenus par polissage et sont caractérisés à l'échelle d'observation. Les paramètres de surfaces sont corrélés avec les performances au décoffrage pour ces trois états de surface. L'action d'un bioadjuvant sur les phénomènes d'adhésion tant au niveau des efforts de décoffrage que de la qualité de parement est évaluée pour trois taux d'incorporation de bioadjuvant. Les résultats mettent en évidence qu'un degré de polissage spécifique combiné à l'utilisation d'un taux de bioadjuvant minimum dans la pâte cimentaire permettent d'atteindre des performances au décoffrage équivalentes à celles obtenues avec un agent décoffrant classique.

Mots clés : coffrage acier / ciment / rugosité / adhésion / bioadjuvant

Abstract. Influence of a bioadmixture on adhesion between cement and formwork – Analysis of the roughness of formwork surfaces. The objective of this work is to understand how adhesion between cement and formwork is influenced by the morphology of the formwork's surface and the addition of a bioadmixture. Indeed, mechanical anchoring of the cement paste is related to the roughness of the formwork's surface. A procedure using interferometry is developed in order to characterise the morphology of the surfaces which were in contact during formwork process: formwork and cement. It allows to determine a scale observation to which the surface texture parameters S_a , S_q , S_{dr} , V_{vc} et V_{vv} are representative of the surface shape features. The surface of the formwork is polished in order to get three different types of surface texture which are characterised at the scale observation. The surface parameters are correlated with the demoulding performance. Three ratios of bioadmixture are studied in order to assess if the bioadmixture can be determinant to minimise the demoulding effort while preventing the development of biofilms and guaranteeing the requirements of aesthetic. The results highlight that a specific polishing degree combined with a minimum ratio of bioadmixture in cement paste allow to achieve equivalent performances as with classical demoulding agent.

Keywords: steel formwork / cement / roughness / adhesion / bioadmixture

* e-mail: calypso.chadfeau@insa-strasbourg.fr

1 Introduction

Indispensable dans le domaine de la construction et en amélioration constante, le procédé de coffrage conditionne la qualité des structures en béton. 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. Outre les formulations de béton, les dispositions prises lors du coffrage, le choix du système de coffrage et les traitements appliqués conditionnent la qualité finale du parement de béton. La teinte, la planéité et le bullage sont les critères retenus par la majorité des acteurs de la construction. Le texte normatif NF EN 13670, de février 2013 rapporte les définitions de types de parement.

La surface de l'ouvrage après décoffrage doit répondre aux exigences techniques : résister aux diverses agressions extérieures, conserver son état dans le temps de la vie de l'ouvrage, tout en assurant le respect des exigences esthétiques prédéfinies dans le cahier des charges. Deux facteurs sont primordiaux dans l'obtention d'un parement de qualité : la formulation du béton et sa mise en œuvre. Le coffrage est donc déterminant pour atteindre la qualité de parement exigée et conditionner l'évolution de celle-ci dans l'environnement de l'ouvrage. Il va particulièrement influencer différentes périodes de la vie d'une structure en béton : lors de la mise en œuvre du béton (coulage), lors de sa prise et de son durcissement puis lors du décoffrage.

Les banches métalliques sont les coffrages verticaux utilisés le plus couramment pour les parois verticales des ouvrages, celles-ci sont recouvertes d'agents de démoulage qui ont pour objectif de faciliter le décoffrage en limitant le phénomène d'adhésion du béton sur le coffrage.

En France, il existe une classification des agents de démoulage depuis 2004. Cette classification a été établie par le Syndicat National des Adjuvantières, SYNAD en concertation avec le Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton (CERIB). La dernière version (2015) intègre les exigences d'un nouveau règlement européen relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des produits chimiques (CLP : Classification Labelling and Packaging), une politique Hygiène, Sécurité et Environnement (HQE) renforcée dans l'industrie ainsi que la volonté d'appliquer une gestion durable de la production et de l'utilisation des substances chimiques. Le développement des produits intégrant dans leur composition un certain pourcentage de composés végétaux s'inscrit dans la démarche de Développement Durable à la fois des industriels et des utilisateurs.

Néanmoins, l'application soignée des agents de décoffrage est une opération délicate. Le technicien doit pulvériser de façon uniforme l'huile de décoffrage sur la paroi coffrante. Ce travail est fastidieux pour le technicien et peut constituer comme un risque aussi bien pour ce dernier (risque de chute sur sol glissant, risque chimique par contact par exemple) que pour l'environnement (déversement au sol, infiltration des nappes phréatiques

par exemple) [1]. C'est pourquoi, le projet ERGOFORM (ERGOnomic FORMwork) dans lequel s'inscrivent les travaux présentés a pour but de proposer une solution de traitement de l'acier de coffrage offrant une alternative à l'application des agents de démoulage.

Afin de définir des parois qui offrent des facilités de séparation avec le béton, il faut analyser les paramètres influençant l'adhésion coffrage/béton. De nombreux auteurs ont étudié l'interface béton/agent de démoulage/coffrage [2–7] et la formation de la peau du béton en contact avec l'agent de démoulage et/ou la paroi [5,8–11]. Cette peau, dont l'épaisseur varie du micromètre au centimètre selon la nature du béton, du coffrage et de la cure [12], est constituée principalement de ciment en surface. L'adhésion du béton sur les coffrages peut être due à des phénomènes d'ancrage mécanique [13–16], de forces électrocapillaires [13–15,17], et de liaisons chimiques [15–17]. Une surface coffrante de rugosité importante ou présentant des cavités importantes favorise l'ancrage mécanique du béton [13–16] et augmente l'adhérence. De plus, l'ouvrabilité du béton, la finesse de grain du ciment, la mise en œuvre sont des paramètres qui influent également sur l'adhésion béton/coffrage. La mouillabilité de la surface coffrante et son énergie de surface interviennent dans les forces électrocapillaires [13–15,17], en influençant la formation d'une mince couche d'eau à l'interface pendant le durcissement. Lors de la prise, les réactions chimiques génèrent une mise en solution d'ions à l'interface avec le coffrage. Des liaisons chimiques peuvent ainsi apparaître entre les ions présents au niveau de la surface métallique (ions OH⁻, Fe²⁺ ...) et ceux issus de la pâte fraîche en contact (OH⁻, Ca²⁺...), et ainsi favoriser l'adhésion coffrage/pâte [15–17].

Dans le but de pouvoir proposer des solutions béton/parois qui se séparent facilement et offrent de bonnes qualités de parement, ce travail propose l'analyse de l'influence de la composition d'un béton ainsi que l'influence de la qualité de surface d'une paroi coffrante sur l'adhérence ciment/coffrage. Une corrélation entre les paramètres de rugosité et l'adhérence ainsi qu'entre composition du ciment et adhérence est étudiée. En effet, peu de travaux ont étudié l'effet des caractéristiques de surface du coffrage sur la capacité du béton à adhérer à celle-ci [11]. De plus, dans le but de proposer des matériaux cimentaires plus écorespectueux et plus durables, l'influence de l'incorporation d'un adjuvant biosourcé est analysée. Ce produit biosourcé est fabriqué à partir de substances biologiques et biocompatibles avec l'environnement. Il est issu de la culture de souches *Pseudomonas fluorescens*. Des travaux précédents [18–20] effectués dans le cadre du projet ANR SEPOLBE, ont montré deux effets majeurs du bioadjuvant : une action modificatrice des propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci ainsi qu'une capacité inhibitrice de corrosion sur les armatures en acier. Ce bioadjuvant a un effet sur les produits d'hydratation du matériau cimentaire, notamment la quantité et la morphologie de la portlandite. En effet, l'adsorption des particules de

Tableau 1. Caractéristiques spécifiques et composition chimique du ciment CEM II B-S 42,5 N CE CP1 NF – Société EQIOM.

Caractérisation physique														
											Masse volumique (g/cm ³)	3,04		
											Surface massique (cm ² /g)	4040		
											Besoin en eau (%)	29,8		
											Stabilité (mm)	0,2		
											Début de prise (min)	206		
Caractérisation chimique														
PAF	INS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	S-	Cl-	CO ₂	CaO Libre	Na ₂ O éq. actif
1,2	0,5	23,9	6,1	2,4	54,8	5,6	3	0,9	0,31	0,28	0,07	0,9	1,5	0,74
Composition déclarée (%)														
											Clinker (K)	67		
Constituants											Laitier de haut-fourneau (S)	31		
											Constituants secondaires	2		
Régulateur de prise											Anhydrite	4,3		
Additif											Agent de mouture CXN2	0,050		
Composition potentielle du clinker														
											C3A	7		
											C3S	63		
											C4AF	10		

l'adjuvant en surface des grains génère la création d'une barrière à la germination et limite ainsi la croissance des hydrates au jeune âge.

Un dispositif expérimental original d'évaluation des efforts de décoffrage à 24 h a été conçu. Une comparaison est établie entre les pâtes cimentaires avec et sans bioadjuvant. D'après les premiers résultats, les pâtes de ciment contenant du bioadjuvant ont pour effet de contribuer à la réduction des efforts de décoffrage. Les analyses des surfaces coffrantes et des parements sont effectuées par microscopie interférométrique. L'influence des paramètres de rugosité de surface est étudiée.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériaux

2.1.1 Chantillons de pâte cimentaire

2.1.1.1 Ciment

Les échantillons de pâte cimentaire sont réalisés à base de ciment CEM II B-S 42,5 N CE CP1 NF fourni par la société EQIOM, et provenant du site de Héming (57) dont les

caractéristiques spécifiques et la composition chimique sont rapportées dans le [tableau 1](#). Le rapport E/C utilisé est égal à 0,4. Le mélange se fait avec de l'eau potable.

La confection de la pâte respecte les étapes décrites dans la norme NF EN 196-3 : deux temps de malaxage de 90 s à vitesse lente séparés par un temps d'homogénéisation de la pâte de 30 s.

Le ciment est conservé dans des fûts hermétiques dans des conditions d'humidité et de température de laboratoire. Les échantillons de pâte cimentaire sont fabriqués avec du ciment prélevé dans un fût unique. Une étude granulométrique de la poudre contenue dans le fût est réalisée. La distribution granulométrique, présentée en [figure 1](#), de la poudre de ciment est déterminée par granulométrie laser sur la base de cinq prélèvements dans le même fût.

La courbe affiche une distribution multimodale composée de trois modes : un mode principal à 18,7 µm, et deux modes secondaires d'importance croissante respectivement à 586 µm et à 0,6 µm. Le ciment présente un diamètre médian D₅₀ de 15,4 µm, D₁₀ est égal 2,3 µm et à D₉₀ à 70,5. La dimension moyenne de la plus petite des particules

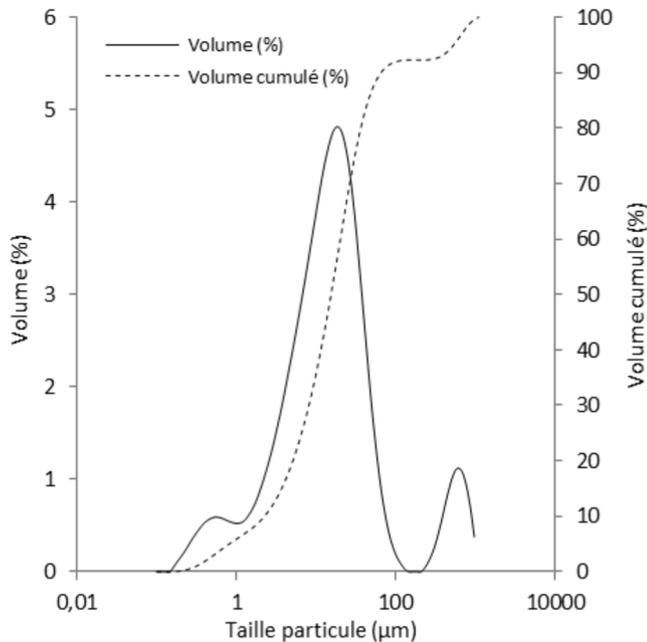


Fig. 1. Distribution granulométrique et distribution granulométrique cumulée en volume du ciment CEM II B-S 42,5 N CE CP1 NF par granulométrie laser.

repérée est égale à $0,166 \mu\text{m}$ et la dimension moyenne de la plus grande des particules contenue dans l'échantillonnage est égale à $976 \mu\text{m}$.

2.1.1.2 Bioadjuvant

Le bioadjuvant est élaboré suivant une procédure développée par l'équipe B2HM de l'INRA, dans le cadre de l'ANR SEPOLBE [18,20,21]. Il s'agit d'un biosurfactant d'origine bactérienne obtenu à partir de souches bactériennes *Pseudomonas fluorescens* 495.

Le produit est considéré comme de l'eau au sens de la norme NF EN 934-2. Le protocole de fabrication débute par une congélation des bactéries à -80°C dans des cryotubes. Ces dernières sont ensuite décongelées à 25°C avant d'être inoculées sur une gélose en boîtes de Pétri « King B. Agar » (KBA, Merck), constituant le milieu nutritif des bactéries. L'incubation des boîtes de Pétri se fait entre 20 et 22°C à une humidité relative de 60% . Au bout de 4 jours d'incubation, les cellules sont prélevées par grattage et sont additionnées de 150 mL d'eau stérile déionisée. Ces suspensions sont secouées pendant 3 minutes. Le bioadjuvant est collecté par centrifugation (30 minutes à $18000 \times g$) puis stérilisé à 121°C durant 20 minutes. Placé en aliquotes de 5 mL , il doit être conservé à 4°C jusqu'à son utilisation. La concentration micellaire critique, concentration en tensio-actif à partir de laquelle les micelles se développent spontanément, et l'extrait sec conventionnel, i.e. le taux de matière sèche du produit biosourcé déterminé selon la norme NF EN 480-8, sont respectivement de $0,6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ et $0,06\%$.

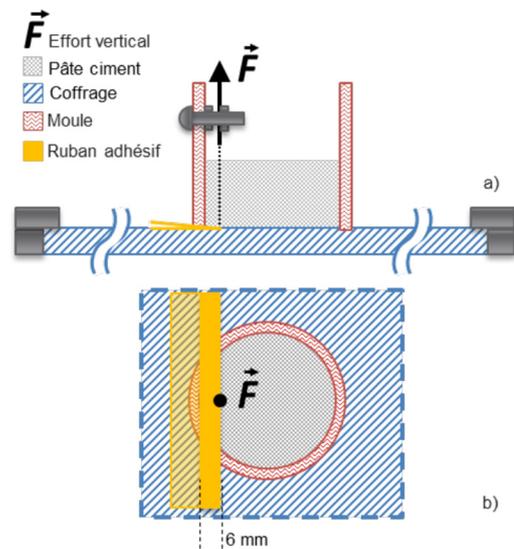


Fig. 2. Dispositif expérimental d'évaluation des efforts de décoffrage: a) vue de face; b) vue de dessus.

Trois concentrations en bioadjuvant, introduites dans la pâte, sont étudiées: $1,5\%$, 3% et 5% . Le bioadjuvant est compris dans le volume d'eau de gâchage de la pâte de ciment et y est directement incorporé en respectant un rapport $E/C = 0,4$ constant.

2.1.1.3 Formulation et mise en œuvre des éprouvettes

La pâte de ciment est coulée dans des moules cylindriques en PVC aux dimensions suivantes:

- diamètre intérieur $\varnothing_{\text{int}} = 27,5 \text{ mm}$;
- diamètre extérieur $\varnothing_{\text{ext}} = 32 \text{ mm}$;
- hauteur $H = 30 \text{ mm}$.

Pour créer la pré-fissuration, une bande de ruban adhésif est collée sur la plaque puis repliée sur elle-même. Pour positionner le moule, un trait à 6 mm du bord extérieur de la bande collée est tracé (Fig. 2).

Chaque moule est préalablement positionné sur une plaque de coffrage et rempli de 8 mL de pâte de ciment à l'aide d'une seringue graduée à $\pm 1 \text{ mL}$. Chaque échantillon est ensuite vibré à l'aide du vibreur adapté pendant 30 s . Après la vibration, ils sont placés en cure normalisée pendant 24 h dans les conditions suivantes: température $T = 20,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$ et une humidité relative supérieure ou égale à 90% (NF EN 196-1).

2.1.2 Eléments de coffrage

2.1.2.1 Acier de coffrage

L'acier (F17) utilisé pour le coffrage des échantillons est un acier inoxydable ferritique à 17% de chrome, désignation européenne selon la norme NF EN 10088-2: X6Cr17, 1.4016. (Tab. 2).

Des plaques de cet acier sont découpées suivant deux formats: $160 \times 94 \times 5 \text{ mm}^3$ et $94 \times 60 \times 5 \text{ mm}^3$. Le second format est employé dans le cas de plaques polies.

Tableau 2. Composition chimique de l'acier F17–HUS–SOR.

Eléments	C	Si	Mn	Cr
%	0,05	0,35	0,40	16,5

2.1.2.1.1 Procédures de modification de la rugosité de surface par polissage

Deux morphologies de surface sont préparées par polissage automatique à partir de plaques de référence F17 de dimensions : $94 \times 60 \times 5 \text{ mm}^3$: un polissage automatique dit miroir et un polissage automatique nommé intermédiaire.

Le polissage automatique se fait à l'aide d'une polisseuse automatique Buehler Motopol 2000 réglée à 150 tour/min, et à une force de 200 N. Avant chaque série de polissage, trois plaques sont au préalable fixées à l'aide d'une cire naturelle à la tête de polissage.

2.1.2.1.2 Polissage automatique – miroir

Le polissage automatique miroir utilise trois granulométries dégressives de papier abrasif P180 pendant 6 minutes, P320 pendant 1 min 30 s, P600 pendant 1 min 30 s, P1200 pendant 1 min 30 s. Après ces étapes, les plaques sont rincées à l'eau courante, séchées au coton puis plongées dans un bain d'ultrasons dans un mélange d'eau distillée et d'éthanol pendant 5 min. Cette étape est finalisée par un rinçage à l'eau courante, suivi d'un rinçage à l'éthanol puis d'un séchage par ventilation d'air chaud. Suit un polissage automatique avec des suspensions et pâtes diamantées $6 \mu\text{m}$ pendant 2 minutes ($\times 2$) et $3 \mu\text{m}$ pendant 5 minutes. Les plaques sont successivement rincées à l'eau et à l'éthanol, et séchées au coton. Un bain d'ultrasons et un séchage par ventilation d'air chaud terminent le cycle de polissage.

2.1.2.1.3 Polissage automatique – Intermédiaire

Le polissage automatique intermédiaire est réalisé uniquement avec les papiers abrasifs P180 pendant 6 minutes et P320 pendant 3 minutes. Un rinçage à l'eau courante, suivi d'un séchage au coton puis un bain d'ultrasons dans un mélange d'eau distillée et d'éthanol pendant 5 min sont ensuite réalisés. Le polissage est finalisé par un rinçage à l'eau courante, suivi d'un rinçage à l'éthanol puis d'un séchage par ventilation d'air chaud.

2.2 Procédures expérimentales

2.2.1 Essai de pré-fissuration

L'essai permet de mesurer la force nécessaire pour séparer l'échantillon de pâte cimentaire du coffrage. Le mode de rupture principalement employé est le mode I, (appelé

également clivage) [22,23]. La pré-fissuration créée à l'interface coffrage/ciment amorce la séparation. Un schéma illustre le dispositif expérimental en figure 2.

L'effort perpendiculaire aux surfaces en contact est appliqué au droit du front de pré-fissuration par un système d'attache réalisé à l'aide d'une vis et de deux écrous reliés à un fil d'acier en forme de crochet lui-même lié à un vérin. Chaque série d'essais de pré-fissuration se fait avec une seule gâchée. L'essai de pré-fissuration est réalisé avec des échantillons coulés depuis $24 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$.

La procédure d'essai se décompose en 4 étapes :

- La plaque de coffrage est positionnée sur le rail de guidage de la machine d'essai de manière à aligner l'effort et le front de pré-fissure ;
- Le crochet est ancré entre les deux écrous pour assurer une application de l'effort verticale et centrée au droit du front de pré-fissure ;
- La plaque est fixée au rail de guidage de la machine d'essai au niveau de ses deux extrémités ;
- Le chargement est appliqué par l'action du vérin, vitesse de déplacement : $0,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

L'essai permet de relever la force en fonction du déplacement jusqu'à ce que les deux surfaces coffrage/ciment soient désolidarisées. L'évaluation de l'adhérence entre ces deux surfaces peut ainsi être associée à la force ou à l'énergie mesurée par un tel essai de séparation [22,23].

2.2.2 Rugosité de surface des coffrages

2.2.2.1 Evaluation de la rugosité – Détermination des échelles de référence

Pour évaluer la modification de la rugosité des plaques après polissage, un relevé de 100 mesures de topographie de surface est réalisé avec un microscope interférométrique Bruker Contour GT-K[®] sur chaque plaque polie à une échelle de référence. Chaque mesure est distante de 5 mm. La rugosité de surface des plaques F17 polissage miroir et polissage intermédiaire est évaluée suivant cinq paramètres : Sa, Sq, Sdr, Vvv et Vvc. Ils sont définis dans le tableau 3 selon la norme NF EN ISO 25178-2 [24].

Afin d'étudier l'influence du bioadjuvant sur la morphologique de surface des pâtes cimentaires, un relevé de 100 mesures à l'échelle de référence est pratiqué sur les échantillons de pâtes cimentaires dont l'hydratation est stoppée juste après décoffrage, soit à 24 h. Les mesures sont espacées de 1 mm. Les paramètres Sa, Sq, Sdr, Vvv et Vvc sont également étudiés.

Il est important de noter que la caractérisation de la rugosité des surfaces dépend de l'échelle d'observation et de l'appareil employé [25–27]. La valeur des paramètres d'état de surface dépend des dimensions du maillage choisi par le manipulateur en fonction de l'appareil de mesure. Il faut donc déterminer ces paramètres en fonction des hétérogénéités de surface de façon à obtenir une homogénéité des résultats pour les mêmes états de surfaces, celles-ci étant de dimensions plus ou moins grandes. C'est pourquoi une procédure non normalisée de détermination d'une échelle d'observation de référence est proposée. Elle a pour objectif

Tableau 3. Paramètres d'états de surface étudiés selon la norme ISO 25178-2.

Paramètre surfacique d'amplitude Sa: hauteur moyenne arithmétique, [nm]	$S_a = \frac{1}{A} \iint z(x, y) dx dy$
Paramètre surfacique d'amplitude Sq: hauteur moyenne quadratique [nm]	$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint z^2(x, y) dx dy}$
Paramètre surfacique hybride Sdr: rapport de surface interfaciale développée de la surface à échelle limitée [%]	$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right]$
Paramètre fonctionnel de volume Vvv (p): espace libre de la vallée de la surface à échelle limitée [nm ³ /nm ²] p est pris égal à 80 %	$V_{vv} = V_v(p) = \frac{K}{100\%} \int [S_{mc}(p) - S_{mc}(q)] dq$
Paramètre fonctionnel de volume Vvc (p;q): espace libre du noyau de la surface à échelle limitée [nm ³ /nm ²] p est pris égal à 10 % q est pris égal à 80 %	$V_{vc} = V_v(p) - V_v(q)$

de déterminer une échelle d'observation pour laquelle une homogénéité des valeurs des paramètres de rugosité est obtenue.

La procédure de détermination de l'échelle de référence est appliquée sur la surface du coffrage et sur la surface cimentaire en contact pendant 24 h avec ce coffrage. La surface cimentaire étudiée est une surface de référence et ne comporte pas de bioadjuvant.

Dans le but de déterminer l'échelle d'observation pour laquelle les paramètres de rugosité étudiés sont homogènes et représentent la morphologie de la surface, une procédure appelée procédure de recollement est appliquée sur les surfaces d'acier de référence F17.

Cette procédure de recollement exploite la fonctionnalité appelée « stitching » de l'interféromètre (Fig. 3). La moyenne arithmétique des paramètres de surfaces ponctuels (S_{a_1}, S_{a_2}, \dots) et la valeur du même paramètre ($S_{a_{recol}}$) sont comparées. Ce dernier paramètre ($S_{a_{recol}}$) est obtenu à partir des paramètres ponctuels obtenus (recolés) suivant la procédure de recollement pour laquelle une zone de recouvrement de 10 % est considérée.

Ceci est réalisé à six échelles d'analyse et pour différents diamètres de cercle de recollement. Trois diamètres sont définis: 1,5 mm, 2 mm et 5 mm. La dimension de ces diamètres est justifiée par le compromis entre les capacités techniques de l'appareil de mesure et la correspondance entre l'aire mesurée par interférométrie et l'aire de contact pâte/coffrage. Le tableau 4 précise les rapports entre ces deux aires. Le diamètre du moule utilisé pour la fabrication des échantillons est égal à 27,5 mm et l'aire de contact pâte/coffrage est de 541 mm². Six dimensions de maille (m^1, m^2, \dots) sont utilisées: $2,3 \times 1,7$ mm²; $1,3 \times 0,9$ mm²; $0,6 \times 0,5$ mm²; $0,2 \times 0,2$ mm²; $0,1 \times 0,1$ mm²; $0,06 \times 0,05$ mm². Les conditions de mesures des six échelles sont rapportées dans le tableau 5.

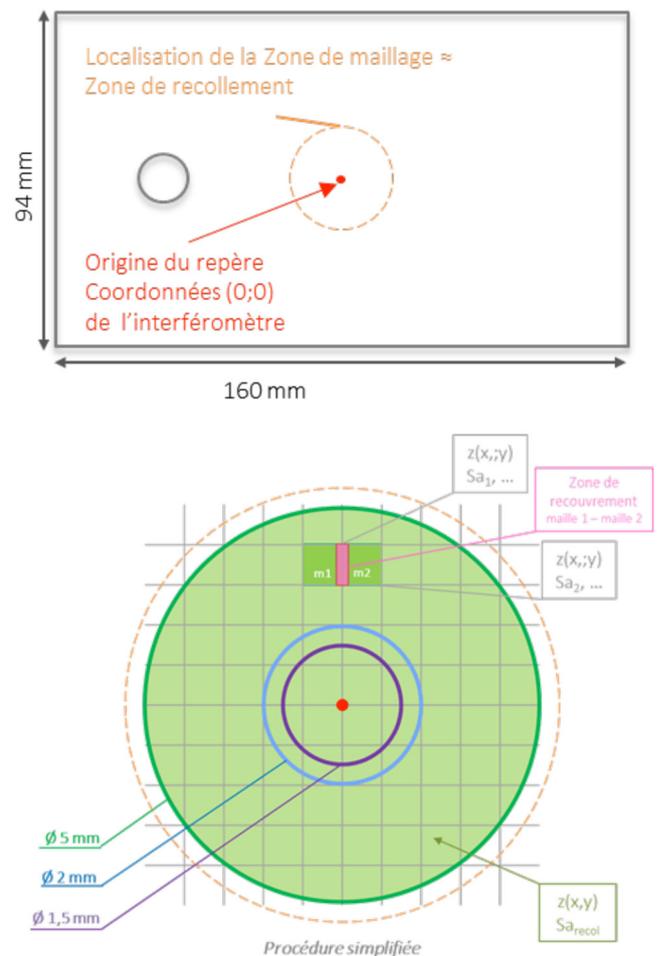
**Fig. 3.** Procédure de recollement pour l'évaluation de la rugosité de surface des plaques de coffrage.

Tableau 4. Rapports entre l'aire de contact ciment/coffrage et l'aire de recollement.

Diamètre cercle de recollement (mm)	Aire de recollement (mm ²)	Rapport Aire de contact/Aire de recollement
1,5	1,8	301
2	3,1	175
5	19,6	28

Tableau 5. Dimensions des mailles pour chaque échelle étudiée et échantillonnage spatial.

N° échelle	Measurement area		Spatial sampling (μm)
	X (μm)	Y (μm)	
1	2282,3	1711,8	3,6
2	1264,4	948,3	2,0
3	636	477	1,0
4	228,5	171,4	0,36
5	126,6	94,6	0,20
6	63,7	47,8	0,10

Pour chaque échelle, la résolution verticale de l'appareil est de 5 nm. Chacune des mailles, pour toutes les échelles est composée de 307 200 (640 × 480 pixels) valeurs d'altitude Z(x,y). L'échelle d'analyse offrant la dispersion la plus faible et la résolution latérale la plus fine est retenue comme échelle d'analyse d'homogénéité. La morphologie des surfaces est caractérisée alors par la valeur des paramètres de rugosité à cette échelle, appelée échelle de Référence

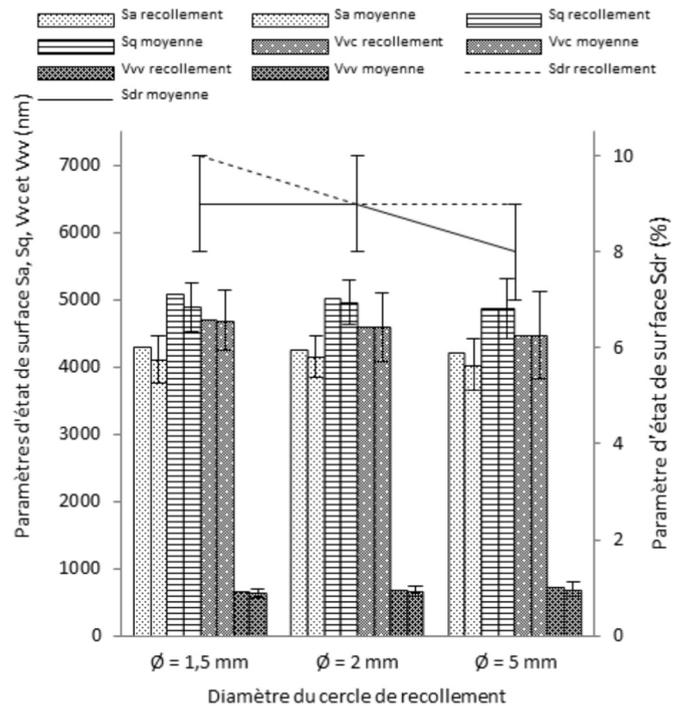
3 Résultats et discussion

3.1 Echelle de référence

3.1.1 Surface de coffrage

Le graphique en figure 4 présente les résultats de la procédure de définition de l'échelle de référence. Les échelles 4 à 6 aux mailles plus fines, correspondant à un objectif plus grand, induisent le relevé de plus de 8000 mesures pour certaines (Tab. 6). Le temps de mesure et le temps de traitement dans ces cas sont de plusieurs heures. Pour les échelles 1 et 2 aux mailles plus grossières, correspondant à un objectif plus faible, le nombre de mesures est relativement réduit.

Pour le paramètre d'état de surface Sa, aux échelles 2 et 3 et pour les trois diamètres considérés, la valeur recollée et la moyenne des valeurs ponctuelles sont égales. À l'échelle 1, cette égalité n'existe pas à l'exception du plus petit diamètre pour lequel le nombre de mesures ponctuelles est faible. Aux échelles, 4, 5 et 6, l'égalité entre valeur recollée du paramètre et moyenne des valeurs n'existe pas et cela pour les trois diamètres.

**Fig. 4.** Comparaison des paramètres d'état de surface recollés et moyennés à l'échelle 3 (0,6 × 0,5 mm²) pour la surface de coffrage de référence F17.

De plus, la dispersion des valeurs ponctuelles est relativement plus importante à ces échelles ; le nombre de mesures également. Pour le paramètre Sa, deux échelles peuvent donc être retenues : 2 et 3.

Le paramètre Sq affiche la même tendance. L'égalité entre valeur recollée et moyenne des valeurs ponctuelles est présente aux échelles 2 et 3 et ceci pour les trois diamètres. De même, il n'y a pas d'égalité pour l'échelle 1 sauf dans le cas du plus petit diamètre. L'augmentation des échelles induit une augmentation de la dispersion des valeurs ponctuelles, pour ce paramètre également. Comme pour le paramètre Sa, les échelles 2 et 3 sont validées.

Aux trois premières échelles, le paramètre Sdr affiche moins de stabilité comparativement aux paramètres Sa et Sq. Pour le paramètre Sdr, l'égalité entre valeur recollée et moyenne des valeurs ponctuelles apparaît pour les échelles 3 et 4 et pour les trois diamètres, pour l'arrondi à l'unité. Aux échelles 1 et 2, pour les trois diamètres, il n'y a pas d'égalité. L'augmentation des valeurs recollées aux échelles 4, 5 et 6 est plus rapide qu'aux échelles 1, 2 et 3. Cependant, la dispersion des valeurs ponctuelles est aussi plus importante. Pour ce paramètre, les échelles 3 et 4 sont retenues.

Ainsi, les paramètres de surface Sa et Sq sont stables pour les trois premières échelles. Pour les échelles 2 et 3 et pour les trois diamètres définis, les deux paramètres de surface considérés affichent une égalité entre la valeur recollée et la moyenne des valeurs ponctuelles. Cette égalité est présente pour le paramètre Sdr aux échelles 3 et 4. À partir de l'échelle 4 et pour tous les diamètres, qu'il s'agisse des valeurs recollées ou des valeurs moyennes, une

Tableau 6. Nombre de mesures en fonction des tailles de maille et du diamètre de recollement.

N° échelle	Taille maille (mm ²)	Nbr mesures Ø = 1,5 mm	Nbr mesures Ø = 2 mm	Nbr mesures Ø = 5 mm
1	2,3 × 1,7	2	4	12
2	1,3 × 0,9	4	8	37
3	0,6 × 0,5	12	20	128
4	0,2 × 0,2	72	128	683
5	0,1 × 0,1	214	368	2123
6	0,06 × 0,05	796	1360	8196

dispersion importante des valeurs ponctuelles apparaît. De plus, une dispersion notable entre valeurs recollées et valeurs moyennes est repérée pour les échelles 4, 5 et 6 : l'écart-type sur les valeurs des moyennes n'intègre plus les valeurs recollées aux échelles respectives pour les deux paramètres Sa et Sq.

Les mesures par interférométrie permettent ainsi de retenir l'échelle 3 (0,6 × 0,5 mm²) comme échelle de référence pour la caractérisation selon les paramètres Sa, Sq et Sdr de la morphologie de surface des coffrages. Cette échelle garantit la stabilité des résultats et assure une valeur ponctuelle comme représentative de la morphologie de la surface du matériau de référence pour les trois paramètres de rugosité considérés.

L'analyse des paramètres de volume Vvc et Vvv confirme ce choix d'échelle de référence. Pour les trois diamètres, la dispersion des paramètres Vvc et Vvv suit la tendance de celle des paramètres Sa et Sq, et est ainsi moins importante relativement à celle du paramètre Sdr.

3.1.2 Surface cimentaire de référence sans bioadjuvant

La **figure 5** rapporte les résultats de la procédure de détermination de l'échelle de référence appliquée à la surface cimentaire.

Aux échelles 2 et 3, pour tous les diamètres de recollement, et pour chaque paramètre étudiés, valeur recollée et moyenne des valeurs ponctuelles sont égales. À l'échelle 1, cette égalité ne se retrouve pas pour les paramètres Sa et Sdr aux diamètres 1,5 mm et 2 mm, et Sq au diamètre 1. De même, il n'y a pas d'égalité pour les paramètres Vvc au diamètre 2 mm et Vvv au diamètre 1,5 mm. À l'échelle 4, il y a égalité pour les paramètres Sdr quel que soit le diamètre de recollement, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres paramètres surfaciques Sa et Sq. Concernant les paramètres de volume, à l'échelle 4, il y a égalité uniquement pour le paramètre Vvv aux diamètres 1,5 mm et 2 mm. À l'échelle 5, pour les paramètres Sa et Sdr, il y a égalité pour les deux premiers diamètres seulement. À l'échelle 6, il y a égalité uniquement pour le paramètre Sdr et uniquement pour le diamètre 2 mm. Aux échelles 5 et 6, pour les paramètres de volume, les capacités de l'appareil ne permettent pas de conclure.

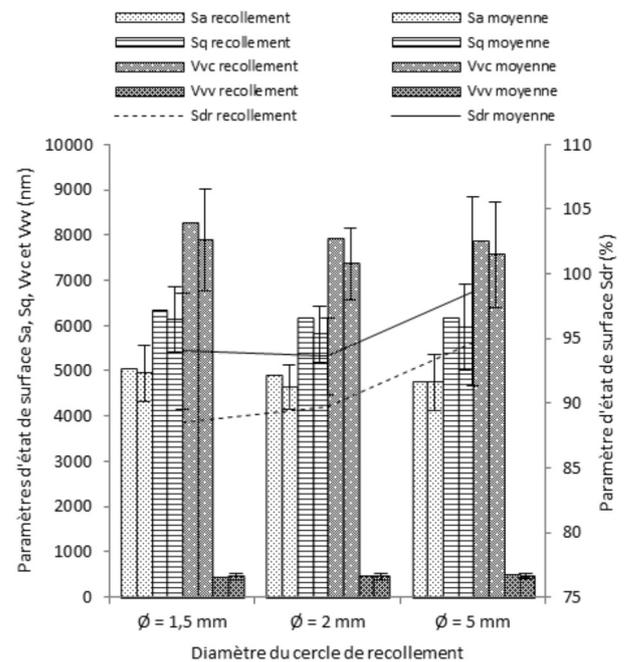


Fig. 5. Comparaison des paramètres d'état de surface recollés et moyennés à l'échelle 3 (0,6 × 0,5 mm²) pour la surface cimentaire âgée de 24 h après cure contre un coffrage F17.

De façon similaire aux surfaces métalliques, une dispersion importante entre les valeurs recollées des paramètres de surface et les moyennes des valeurs ponctuelles est observée. La stabilité de la mesure se perd avec la réduction de la taille de la maille d'évaluation.

L'échelle de référence pour les pâtes cimentaire retenue est donc l'échelle 3, à la maille 0,6 × 0,5 mm² pour deux raisons. Premièrement, la stabilité des mesures des paramètres de surface indique que les valeurs ponctuelles à cette échelle sont représentatives d'une surface plus étendue. Deuxièmement, une correspondance entre échelle de référence des surfaces métalliques et échelle de référence des surfaces cimentaires est constatée.

La procédure de recollement présentée a permis de définir une échelle de référence avec une mise en œuvre simple. Cette étape préalable à l'analyse de la morphologie de surface de coffrage après différents traitements est indispensable pour évaluer l'impact du polissage sur l'état

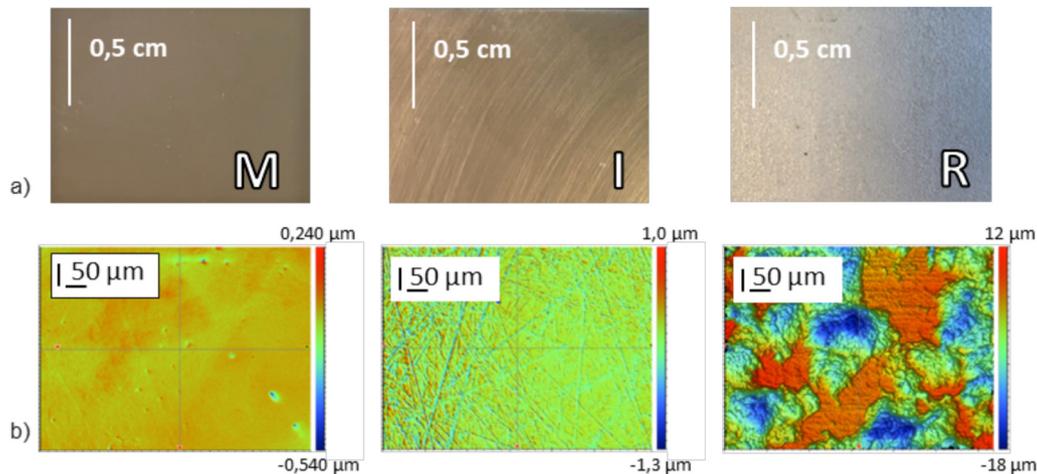


Fig. 6. Etats des surfaces d'acier polies et de référence: a) Aspects de surface—échelle macroscopique: polissage miroir (M), intermédiaire (I) et surface de référence (R). Surface analysée $0,6 \times 0,5 \text{ mm}^2$. b) cartographie par interférométrie des états de surface pour: polissage miroir (M), intermédiaire (I) et surface de référence (R).

Tableau 7. Valeurs des paramètres de surface et force au décoffrage en fonction du type de polissage.

Type polissage	F max (N)	Sa (nm)	Sq (nm)	Sdr (%)	Vvc ($\text{nm}^3 \cdot \text{nm}^{-2}$)	Vvv ($\text{nm}^3 \cdot \text{nm}^{-2}$)
F17 miroir	25 ± 20	16 ± 8	32 ± 15	$0,01 \pm 0,01$	18 ± 9	5 ± 3
F17 intermédiaire	108 ± 22	111 ± 11	153 ± 33	$0,63 \pm 0,09$	152 ± 14	22 ± 5
F17 référence	140 ± 53	4064 ± 488	4920 ± 593	$11,08 \pm 1,70$	4994 ± 893	647 ± 105

de surface de référence. Les paramètres d'état de surface caractérisant un état de surface d'un matériau sont nombreux [24] et dépendent, entre autres, de sa nature, du traitement de surface appliqué. Les paramètres Sa, Sq, Sdr et les paramètres de volume Vvc et Vv sont régulièrement retenus pour étudier l'impact des matériaux et/ou traitements appliqués aux surfaces [11,28,29].

3.2 Modification de la morphologie de surface par polissage

Deux types de polissage sont réalisés: polissage miroir et polissage intermédiaire. L'observation à l'échelle macroscopique permet de distinguer les trois états de surface, appelés « miroir », « intermédiaire » et « référence ». La figure 6a montre les différentes surfaces obtenues. La surface polie miroir (M) ne présente aucune rayure. Des rayures sont visibles sur la surface intermédiaire (I).

Le tableau 7 rapporte les valeurs des paramètres Sa, Sq et Sdr à l'échelle de référence pour les différents types de polissage. À cette échelle, la modification de la morphologie de surface par polissage est quantifiable grâce aux paramètres de rugosité surfacique.

Les trois paramètres de surface permettent de distinguer le degré de polissage de la surface: miroir, intermédiaire et pas de polissage (Fig. 6b). Ils suivent la même tendance: ils diminuent avec l'augmentation du polissage.

L'action mécanique du polissage sur la morphologie de surface de référence tend à concentrer les altitudes de surface à une valeur commune. Le paramètre Sdr confirme

cet effet: le gain de surface entre surface développée et surface projetée après polissage est inférieur à 0,5 % dans le cas d'un polissage miroir et compris entre 0,5 % et 1 % dans le cas d'un polissage intermédiaire. Il est supérieur à 10 %, pour les surfaces F17 de référence non polies. D'après ce paramètre, la surface offerte au contact du ciment dans le cas des surfaces polies est ainsi réduite (Tab. 7 et Fig. 7).

Les écarts-types obtenus dans le cas du polissage miroir sont relativement plus importants. La résolution verticale de l'appareil dans les conditions de mesures et les valeurs des paramètres de surfaces relevées sont du même ordre de grandeur: 5 nm pour la résolution verticale de l'interféromètre et 16 nm pour le Sa (M). La dispersion des valeurs des paramètres de surface peut provenir des limites du matériel de mesure interférométrique, dans le cas d'une surface très réfléchissante.

Les caractéristiques morphologiques de la surface peuvent être évaluées objectivement à partir de l'analyse des paramètres de surfaces. Les différents travaux conduits sur l'influence de la rugosité dans le contexte du coffrage rapportent essentiellement une caractérisation de la rugosité suivant le paramètre de rugosité de profil Ra, parfois Rt. Certains auteurs [11,28] élargissent la caractérisation à d'autres paramètres. Les paramètres de profil comme par exemple Ra sont souvent utilisés pour caractériser les morphologies de surface [30]. Ils ne sont cependant pas suffisants pour représenter les trois dimensions de celle-ci. Grâce à l'interférométrie optique, les caractéristiques d'une surface sont évaluées non plus sur l'étude de profils c'est-à-dire en 2D (information de hauteur

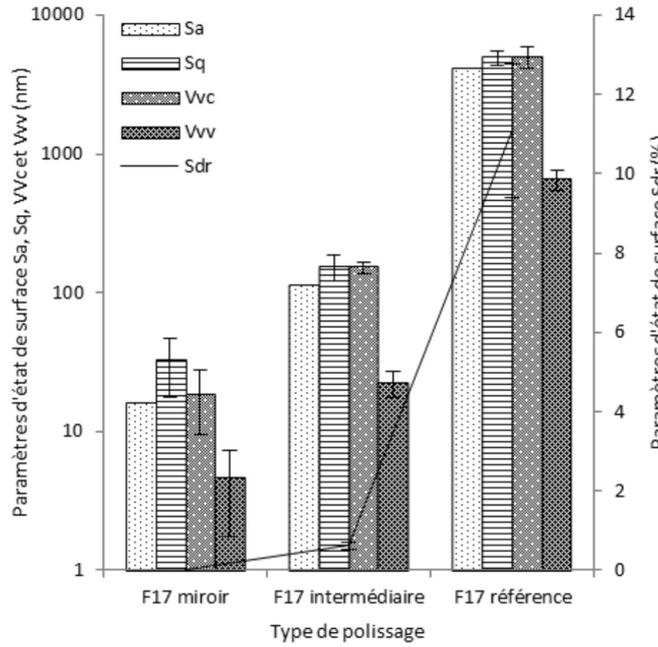


Fig. 7. Evolution de paramètres d'état de surface Sa, Sq, Sdr, Vvc et Vvv en fonction du type de polissage.

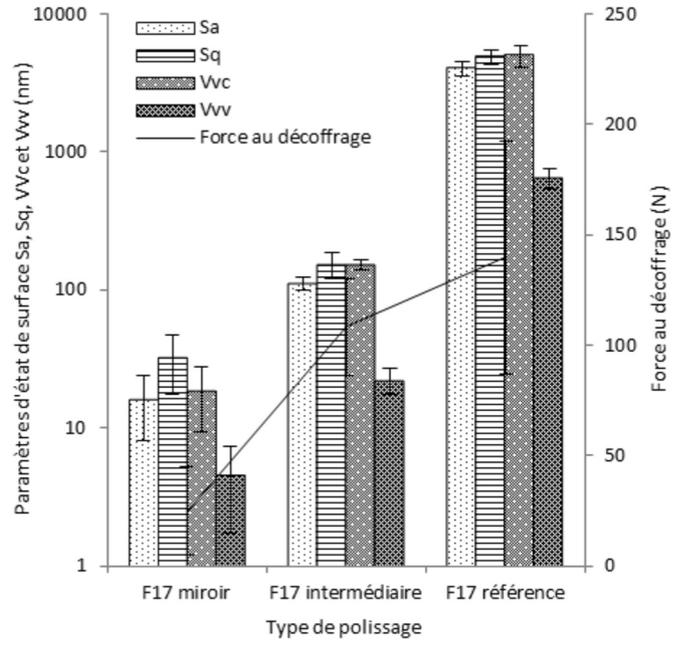


Fig. 8. Evolution de la force au décoffrage et des paramètres d'état de surface du coffrage en fonction du type de polissage.

Tableau 8. Pourcentages de réduction des paramètres de surface et force au décoffrage en fonction du type de polissage.

	Force		Sa		Sq		Sdr		Vvc(10,80)		Vvv(80)	
	% min	% max	% min	% max	% min	% max						
M/R	-48,4	-97,5	-99,3	-99,8	-98,9	-99,7	-99,8	-100	-99,3	-99,8	-98,6	-99,8
I/R	49,7	-55,2	-96,6	-97,8	-95,7	-97,8	-92,4	-95,8	-96,0	-97,6	-95,0	-97,7
M/I	-48,1	-96,3	-76,1	-93,4	-61,1	-85,7	-95,8	-100	-80,1	-94,3	-58,2	-93,5

sur un profil) mais sur l'analyse d'une aire intégrant les informations en 3D de la surface [31].

Spitz et al. [11] ont également étudié l'adhérence entre des coffrages métalliques ou des coffrages revêtus de polymère et du béton. Par analyse interférométrique, ils ont évalué la valeur des paramètres Sa, Sq, Sdr, Vvc et Vv de chaque type de coffrage. Pour leur coffrage en acier doux, le Sa vaut $0,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$, mesuré sur une surface de $4 \times 4 \text{mm}^2$. En comparaison, la rugosité de leur surface d'acier doux est proche de celle de l'acier inoxydable F17 poli Intermédiaire ($Sa = 0,112 \pm 0,013 \mu\text{m}$). Les travaux de Magnoni et al. [32] réalisés sur le même acier inoxydable que celui de cette étude (F17) confirment une valeur de Sa de $4,8 \mu\text{m}$ pour la surface de Référence (R), mesurée sur une surface de $1 \times 1 \text{mm}^2$ avec un profilomètre optique contre $4,1 \mu\text{m}$ environ pour une surface de $0,6 \times 0,5 \text{mm}^2$ avec l'interféromètre.

3.3 Influence de la morphologie de surface sur l'effort au décoffrage

La figure 8 et le tableau 7 présentent les efforts de décoffrage relevés pour chaque type de polissage. Ce sont les valeurs moyennes et les écarts-types obtenus sur 10

échantillons pour l'acier polissage miroir, sur 17 échantillons pour l'acier polissage intermédiaire et 96 échantillons pour l'acier de référence F17. Pour tous les essais avec l'acier polissage miroir, les valeurs sont trop faibles (de l'ordre de 10 N) pour être prises en compte au regard de la précision de mesure. Une seule valeur d'effort a pu être relevée : pour un effort enregistré à 25 N.

Il apparaît clairement une tendance à la réduction de tous les paramètres d'état de surface ainsi que de la force avec la réduction de la rugosité, avec un saut plus important entre l'état miroir (M) et l'état intermédiaire (I) qu'entre l'état (I) et l'état de référence (R).

Le tableau 8 permet d'évaluer les intervalles de réduction des valeurs des différents paramètres de rugosité ainsi que de la force au décoffrage entre les différents états de surface. Compte tenu des écarts types, il apparaît une réduction de tous les paramètres d'état de surface, le pourcentage de réduction est quasiment identique entre l'état de référence et les états polis, que ce soit Miroir ou Intermédiaire : Sa diminue de 99,3 % à 99,8 % entre la surface (R) et la surface polie Miroir et de 96,6 % à 97,8 % entre la surface (R) et polie Intermédiaire. Pourtant, la réduction de la force est de 48,4 % à 97,5 % (M) et de 0 % à 55,2 % (I) : la dispersion des valeurs enregistrées induit un chevauchement des écarts types et explique que la

réduction de la force pour détacher le ciment de ces deux types de surfaces puisse être nulle (le % min entre I et R est positif égal à 49,7%, Tab. 8). Le résultat le plus remarquable se trouve dans la différence de valeurs entre les états I et M où, bien que les réductions des paramètres d'état de surface ne soient pas aussi importantes qu'avec l'état R, on constate une importante réduction (entre 48,1% et 96,3%) de la force à appliquer pour séparer ciment et coffrage lorsqu'on passe d'une surface polie M à une surface polie I.

Les efforts de décoffrage augmentent avec l'augmentation de la surface interfaciale développée. Le paramètre Sdr est un indicateur de la surface possiblement en contact. La surface de coffrage est mise en contact avec une pâte cimentaire fraîche comprenant des phases anhydres et d'autres en cours d'hydratation. Les dimensions de ces phases sont variables : de l'ordre de quelques nanomètres à la centaine de micromètre [33–36]. L'agencement de ces structures cimentaires l'est également : organisation particulaire (sous forme d'agrégats globulaires), cristaux. La forme et les dimensions vont être compatibles ou non avec la morphologie de la surface de coffrage. Cette compatibilité de structure correspond à l'ancrage mécanique. Dans le cas d'une surface non polie, les résultats indiquent que l'ancrage mécanique est plus important pour des surfaces de référence que pour des surfaces polies miroir. Les conclusions sont identiques pour l'analyse des paramètres de volume Vvc et Vvv. Ceux-ci permettent d'apprécier l'espace libre et à disposition à la surface du coffrage. L'augmentation de l'effort de décoffrage suit celle de ces paramètres.

L'adhésion entre le coffrage et la pâte de ciment ou le béton résulte en partie de l'ancrage mécanique. Les conditions physico-chimiques à l'interface coffrage/ciment participent également à la création de liaisons entre les éléments du coffrage et les phases cimentaires. Lors de la phase de coulage, le matériau a commencé son hydratation et celle-ci se poursuit pendant et après le décoffrage. La formation des hydrates est modifiée par les conditions de cure et notamment par le contact avec la morphologie de surface. Les anfractuosités de la surface de coffrage vont pouvoir piéger certaines particules du liant hydraulique. L'environnement chimique à l'interface peut conduire à une croissance particulière des hydrates [37–39]. Il est d'usage courant d'utiliser des agents démoulant. Plusieurs études [2,3,7,40] ont montré l'action de ceux-ci dans la constitution physique et chimique des couches successives du parement en béton à l'état frais et durci. Elles ont mis en évidence que la formation d'un film d'eau, de savon selon la nature de l'agent démoulant, constitue une barrière entre la surface de coffrage et la surface de béton, de ciment. Cette barrière physique et chimique empêcherait alors les éléments fins du béton, du ciment de se loger dans la texture du coffrage. Lorsqu'aucun agent démoulant n'est utilisé, l'eau et le ciment, éventuellement les adjuvants présents dans le béton, sont majoritairement en contact avec la paroi coffrante. Ainsi, différentes textures de coffrage selon le type de polissage influencent l'effort au décoffrage. Lors de la préparation des échantillons de ciment, la vibration induit une circulation de l'eau et des particules fines du ciment. Ce mouvement du fluide peut

être différent selon la texture, la morphologie de la surface de coffrage. Le paramètre Sdr montre ici que l'aire interfaciale développée est plus importante lorsque la surface n'est pas polie. De même, les paramètres Vvc et Vvv confirment que l'espace à disposition pour les éléments fins est plus conséquent pour un coffrage F17 non poli que pour les surfaces polies. L'augmentation de la surface potentiellement en contact, et celle des cavités présentes, crée des conditions favorables au déplacement des particules cimentaires avec l'eau et à l'ancrage mécanique. Cet ancrage mécanique de la surface F17 non polie induit l'augmentation des efforts au décoffrage. En effet, pour les surfaces non polies, la valeur moyenne du paramètre Sa est de l'ordre de 4000 nm (4 μm), de 5000 nm (5 μm) pour Sq. De même, les valeurs respectives de Vvc et Vvv sont de l'ordre de 5000 $\text{nm}^3 \cdot \text{nm}^{-2}$ (soit 5 $\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$) et 700 $\text{nm}^3 \cdot \text{nm}^{-2}$ (soit 0,7 $\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$). Les essais de granulométrie laser précisent que la dimension de la plus petite particule repérée dans l'échantillonnage de ciment est de 0,166 μm , qu'il existe un mode secondaire à 0,6 μm et un mode principal à 18,7 μm (Fig. 1). La pâte fraîche de ciment est mise en contact avec le coffrage dans les 15 premières minutes après l'ajout d'eau au ciment. Les dimensions des grains anhydres sont majoritairement d'une vingtaine de microns mais le ciment présente des particules dont les dimensions les plus faibles sont de l'ordre du dixième de microns. Si l'hydratation de ces particules démarre dès l'ajout d'eau, leur surface dans les premières minutes et les premières heures d'hydratation ne sont pas entièrement recouvertes par les hydrates [35]. Durant la mise en œuvre, un anhydre partiellement hydraté peut donc se loger dans le relief de la surface coffrante. Par ailleurs, les silicates de calcium hydratés (CSH) sont reconnus être les produits d'hydratation principaux de la pâte [41]. Suivant leur état d'hydratation, ils forment des amas dont les dimensions sont de l'ordre de quelques dizaines à plusieurs centaines de nanomètres [42–45]. Les dimensions de ces structures sont compatibles avec celles de la surface de coffrage, et peuvent potentiellement s'y imbriquer, partager plus de surface de contact et participer ainsi à l'ancrage mécanique. Le polissage intermédiaire présente également des valeurs de Sa, de Sdr et de Vvc compatibles avec l'imbrication des particules plus ou moins hydratées de ciment dans le relief du coffrage, cependant, ces valeurs sont plus faibles. Ceci est cohérent avec les valeurs des efforts de décoffrage relevés pour les deux états de surface de coffrage : poli intermédiaire et non poli.

Spitz et al. [11] ont étudié l'adhérence entre quatre surfaces de coffrage : un acier bas carbone, un revêtement en alliage zinc/aluminium (Zn/Al) sur l'acier, un revêtement en polytétrafluoroéthylène (PTFE) et un revêtement polymère de composition inconnue. Leur essai de traction effectué pour séparer un béton de ces différents coffrages a mis en évidence une prédominance de l'effet de l'adhésion capillaire entre les surfaces plus lisses et hydrophobes. Ceci explique que les forces de séparation aient été plus élevées pour ces surfaces alors qu'elles sont moins adhérentes au béton comme en témoignaient leur analyse des surfaces après décoffrage. Les contraintes obtenues pour l'acier bas carbone sont comprises entre 0,01 MPa et 0,03 MPa et sont comparables aux valeurs obtenues avec l'essai de

Tableau 9. Valeur de la force au décoffrage et sa réduction en fonction du type de contact coffrage/ciment et de la concentration en bioadjuvant contenue dans la pâte.

Coffrage/ciment	F max (N)	% moyen	% min	% max
(a) F17/réf. (0)	140 ± 53			
(b) F17 oil/réf. (0)	40 ± 27	-71,2	-22,7	-93,1
(c) F17/réf. (1,5)	132 ± 24	-5,9	79,3	-44,3
(d) F17/réf. (3)	111 ± 27	-20,9	57,8	-56,4
(e) F17/réf. (5)	105 ± 33	-24,8	58,5	-62,3

pré-fissuration évitant l'effet d'adhésion capillaire entre ciment et surface F17 polie Miroir pour laquelle les contraintes varient entre 0,01 MPa et 0,08 MPa. De même, Mazkewitsch et Jaworski [16] ont obtenu des contraintes d'adhérence entre un mortier et un coffrage métallique. Les valeurs des paramètres de rugosité de l'acier ne sont pas précisées, les auteurs indiquent qu'il s'agit d'un coffrage du commerce. Les contraintes, évaluées à l'âge de 1 jour, atteignent 0,185 MPa sans agent de décoffrage. Elles se rapprochent de celles obtenues dans le cas des surfaces F17 de référence et du polissage intermédiaire, soit $0,27 \pm 0,09$ MPa et $0,20 \pm 0,04$ MPa.

L'adhérence entre béton, ciment et coffrage est induite par les forces capillaires, les réactions chimiques, et l'ancrage mécanique. Bien que les essais utilisés pour séparer les matériaux cimentaires des coffrages aient été différents, l'ordre de grandeur des contraintes est identique pour un coffrage métallique présentant une faible rugosité. Il est important de noter que, contrairement à Spitz et al. [11], l'acier utilisé dans cette étude est inoxydable. Il présente ainsi une couche de passivation riche en oxydes de chrome en contact avec le ciment contrairement à la couche formée notamment d'oxydes de fer et d'hydroxydes de calcium pour un acier bas carbone [46–48]. Les réactions chimiques entre un acier bas carbone et le béton sont réputées améliorer leur liaison, les faibles valeurs de contraintes obtenues sont notamment liées aux choix des dimensions des échantillons ainsi qu'aux compositions de béton. Il apparaît nécessaire de confirmer les tendances avec des essais à l'échelle du chantier. De plus, la composition des bétons intervient dans les réactions chimiques par la composition chimique du ciment et celle des adjuvants potentiels. Le rapport eau/ciment et les adjuvants influencent les forces capillaires et les granulats ainsi que la finesse de mouture du ciment interviennent dans l'ancrage mécanique. Ainsi, afin de réduire les efforts au décoffrage, la modification de la morphologie de surface coffrante apparaît une solution qui peut être complétée et optimisée en jouant sur la composition du béton, du ciment. La majorité des bétons contiennent des adjuvants agissant potentiellement sur leurs propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité. C'est pourquoi l'influence d'un adjuvant sur l'adhésion au même type de paroi coffrante a été testée. Cet adjuvant biosourcé a démontré des capacités à inhiber la biocolonisation des pâtes cimentaires et la corrosion des armatures du béton [18,20,49]. Ces propriétés constituent des pistes d'amélioration pour la mise au point d'une solution de démoulage facile à mettre en œuvre sur

chantier et plus éco-respectueuse de l'environnement que les solutions de décoffrage actuelles.

3.4 Influence du bioadjuvant sur l'effort au décoffrage

L'effet de trois concentrations, 1,5 %, 3 % et 5 %, en bioadjuvant sur l'effort au décoffrage est étudié. Cette étude est réalisée avec différents types de contact coffrage/ciment et suivant l'échantillonnage ci-après :

- Pâte de ciment sans BA contre coffrage F17 non huilé–F17/réf (0) : 96 essais ;
- Pâte de ciment sans BA contre coffrage F17 huilé–F17 oil/réf (0) : 64 essais ;
- Pâte de ciment à 1,5 % de BA contre coffrage F17 non huilé–F17/réf (1,5) : 12 essais ;
- Pâte de ciment à 3 % de BA contre coffrage F17 non huilé–F17/réf (3) : 11 essais ;
- Pâte de ciment à 5 % de BA contre coffrage F17 non huilé–F17/réf (5) : 8 essais.

L'huile utilisée est une huile minérale FDI CIMACIRE G[®]. Actuellement, le bioadjuvant est un produit développé en laboratoire et en faible quantité et non commercialisé. Le nombre d'essai est donc relativement moindre que pour les autres formulations.

L'effet réducteur systématique de l'huile sur les efforts au décoffrage est mis en évidence par le pourcentage de réduction de la force au décoffrage : l'effort peut être réduit de 22,7 % à 93,1 % dans le cas d'une surface huilée par rapport à une surface de référence non huilée (Tab. 9).

L'introduction de bioadjuvant dans la pâte cimentaire à 1,5 %, 3 % et 5 % contre un coffrage (R) peut induire une diminution des efforts de décoffrage de 44,3 %, 56,4 % et 62,3 % respectivement. La dispersion importante des résultats entraîne une possibilité de réduction nulle avec l'ajout du bioadjuvant. En effet, les écarts-types induisent un chevauchement des valeurs et des pourcentages minimaux positifs, respectivement 79,3 %, 57,82 % et 58,5 % (Tab. 9) pour les trois concentrations en bioadjuvant. Néanmoins, en considérant les pourcentages de réduction moyens, par rapport à une surface de référence F17 R non huilée, une tendance à la réduction des efforts de décoffrage avec l'augmentation de la concentration en bioadjuvant se dessine. Cette tendance du bioadjuvant à réduire les efforts de décoffrage (valeurs moyennes) n'atteint pas les performances de l'huile de décoffrage (Tab. 9).

Tableau 10. Valeurs des paramètres de surface en fonction du type de contact coffrage/ciment et de la concentration en bioadjuvant dans la pâte cimentaire.

Type contact coffrage/ciment	Paramètres d'état de surface des pâtes cimentaires				
	Sa (nm)	Sq (nm)	Sdr (%)	Vvc ($\text{nm}^3 \cdot \text{nm}^{-2}$)	Vvv ($\text{nm}^3 \cdot \text{nm}^{-2}$)
(a) F17/réf. (0)	4153 ± 493	5238 ± 687	106 ± 16	6623 ± 826	471 ± 112
(b) F17 oil/réf (0)	4411 ± 866	5671 ± 1182	96 ± 27	6892 ± 1377	553 ± 189
(d) F17/réf. (3)	3664 ± 494	4750 ± 806	77 ± 15	5972 ± 814	411 ± 116
(e) F17/réf. (5)	4446 ± 970	5843 ± 1355	100 ± 20	7024 ± 1715	529 ± 150

Toutefois, les enjeux de performances d'une solution d'aide au démoulage intègrent l'aptitude à réduire les efforts au décoffrage mais également les propriétés à assurer la qualité de parement exigée. Les concentrations à 3 % et 5 % de bioadjuvant présentent les tendances à la réduction de force au décoffrage les plus fortes. Le bioadjuvant a démontré [18,20,21] des capacités à diminuer la biocolonisation des surfaces cimentaires. Les concentrations à 3 % et 5 %, repérées comme les plus pertinentes pour réduire les efforts de décoffrage, sont donc étudiées afin d'évaluer leur impact sur la morphologie de la surface cimentaire décoffrée à 24 h.

3.5 Influence du bioadjuvant sur la morphologie de la surface cimentaire

Le tableau 10 et la figure 9 présentent les valeurs et l'évolution des paramètres de surfaces Sa, Sq, Sdr, Vvc et Vvv mesurés par interférométrie sur les surfaces cimentaires avec ou sans bioadjuvant ayant été en contact pendant 24 h avec différents type de coffrage (F17 réf et F17 réf. huilé).

Il semble que l'introduction de 3 % de BA induise des variations de hauteurs plus faibles que la concentration à 5 % et les autres types de contact. Le bioadjuvant à 3 % semble « lisser la surface ».

Les valeurs des paramètres d'état de surface des pâtes cimentaires bioadjuvantées à 3 % et 5 %, des pâtes en contact avec l'huile ou la surface de référence F17 sont du même ordre de grandeur et équivalentes en considérant les écarts-types, tableau 10 et figure 9 : par exemple Sa = 3664 ± 494 nm (3 %), Sa = 4446 ± 970 nm (5 %), Sa = 4411 ± 866 nm (huile), Sa = 4153 ± 493 nm (référence).

En considérant le paramètre Sa, le tableau 11 et la figure 10 représentent les distributions des valeurs de ce paramètre obtenues pour différents types de contact coffrage/ciment et concentration en bioadjuvant.

Les surfaces F17 R/réf(3) présentent une valeur de Sa, (en moyenne et médiane) plus faible que les autres types de surface. De plus, les 75 % des valeurs les plus basses de cette surface sont comprises dans un intervalle incluant des valeurs plus faibles que celles des intervalles des autres surfaces. En effet, cet intervalle (3^e Quart. - Minimum) s'étend de 3888 nm à 2726 nm pour F17 R/réf(3). Dans le cas des surfaces F17 R/réf(0), et F17 R/réf(5), les intervalles sont proches : de 4441 nm à 2968 nm et de 4593 nm et 3095 nm respectivement. Pour les surfaces

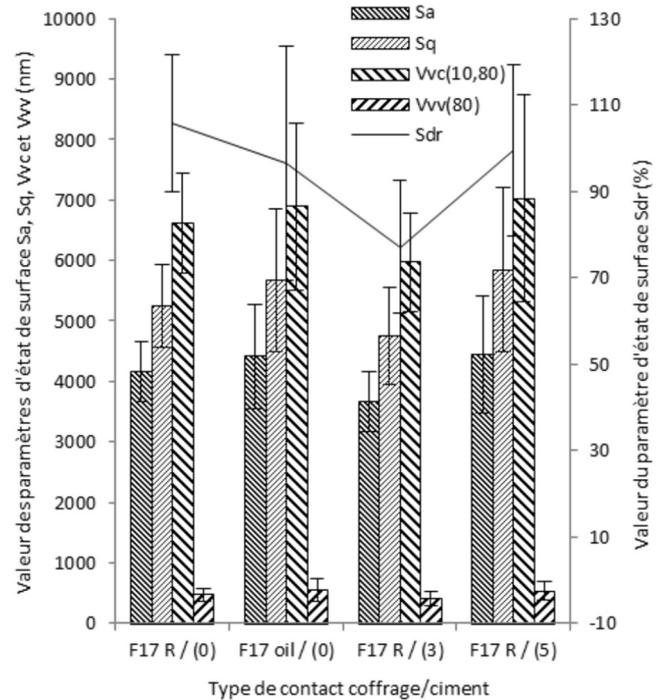


Fig. 9. Evolution de paramètres d'état de surface Sa, Sq, Sdr, Vvc et Vvv en fonction du type de contact coffrage/ciment, et en fonction de la concentration en bioadjuvant.

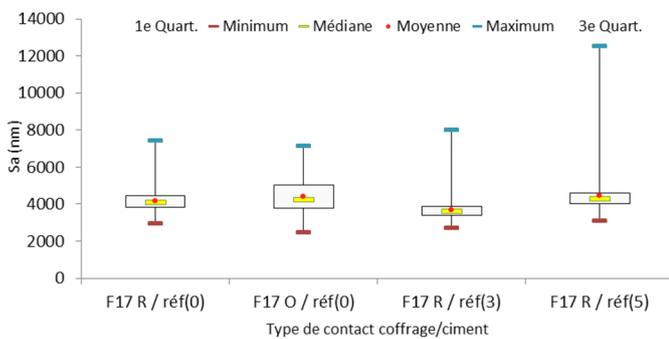
F17 O/réf(0), 75 % des valeurs les plus faibles sont comprises entre 5023 nm et 2483 nm.

La concentration à 3 % de bioadjuvant se révèle être la concentration permettant d'obtenir une surface de parement avec des paramètres d'état de surface dont les valeurs sont moins dispersées autour de leurs moyenne et médiane. Les valeurs les plus dispersées apparaissent avec la surface en contact avec F17 huilé. Pour une concentration à 3 %, l'écart interquartile qui regroupe 50 % des valeurs contient les valeurs du paramètre Sa les plus faibles et est le plus étroit relativement aux autres surfaces : Sa varie entre 3888 et 3371 nm (écart de 517 nm). Il augmente pour une concentration à 5 %, Sa varie entre 4593 nm et 4015 nm (écart de 578 nm), puis pour la surface de référence F17 R/réf(0), Sa varie entre 4441 nm et 3816 nm (625 nm) et enfin est le plus important dans le cas de la surface F17 O/réf(0), Sa varie entre 5023 nm et 3782 (1241).

Par ailleurs, l'écart entre la moyenne et la médiane est aussi le plus faible dans les cas des surfaces. F17 R/réf(3)

Tableau 11. Valeurs caractéristiques de la distribution des valeurs du paramètre Sa pour les différents types de contact coffrage/ciment et concentrations en bioadjuvant.

	F17 R/réf(0)	F17 O/réf(0)	F17 R/réf(3)	F17 R/réf(5)
1 ^e Quart.	3816	3782	3371	4015
Minimum	2968	2483	2726	3095
Médiane	4100	4258	3622	4321
Moyenne	4153	4411	3664	4446
Maximum	7423	7127	8012	12541
3 ^e Quart.	4441	5023	3888	4593

**Fig. 10.** Diagrammes en boîte des distributions de valeurs du paramètre Sa obtenues pour différents types de contact coffrage/ciment et concentrations en bioadjuvant.

(42 nm), puis augmente pour les surfaces F17 R/réf(0) (53) et les surfaces F17 R/réf(5) (125 nm). Il est le plus important dans le cas des surfaces F17 O/réf(0) (154 nm).

Toutefois, la valeur maximale au niveau des surfaces F17 R/réf(3) induit une étendue de la distribution plus importante que pour les surfaces F17 O/réf(0) et F17 R/réf(0) : égales à 5286 nm, 4644 nm et 4455 nm respectivement. L'étendue la plus importante est obtenue pour F17 R/réf(5) : 9446 nm.

Une tendance à la diminution est également constatée pour les autres paramètres d'état de surface dans le cas d'une concentration à 3 % (Fig. 11).

Les figures 10 et 11 ainsi que les tableaux 10 et 11 montrent que les paramètres d'état de surface sont relativement proches entre les différentes combinaisons mais une tendance à la diminution semble se dessiner pour la concentration à 3 % de bioadjuvant. La présence de zones planes visibles sur les cartes de topographie de surface établies par interférométrie (Fig. 12) corrobore la tendance à la diminution de la topographie de la pâte bioadjuvannée à 3 %.

Le tableau 12 permet de comparer les performances au décoffrage des différentes combinaisons « état de surface coffrage/composition de ciment ».

Le polissage miroir semble être la solution permettant d'atteindre la réduction la plus importante des forces au décoffrage, devant l'huile. Ces deux solutions sont les seules qui diminuent systématiquement la force au décoffrage. Un polissage permet de réduire l'ancrage mécanique, dans le cas d'échantillons de petite taille (surface de contact :

541 mm²) le polissage miroir permet d'éviter l'utilisation de l'huile. Cette solution ne semble pas pouvoir être proposée à l'échelle d'une banche (2,40 × 2,80 m²) pour des raisons de mise en œuvre et d'évolution inévitable des surfaces rayées par l'usage. De plus, les forces capillaires pourraient devenir le paramètre prépondérant dans le cas d'une surface trop lisse. L'incorporation de bioadjuvant à la pâte de ciment à 5 % puis à 3 % semble aider à la diminution des efforts de décoffrage. Les pourcentages de réduction de la force sont du même ordre de grandeur que ceux d'un polissage intermédiaire, et plus proches pour la concentration à 3 % bien que la moyenne des forces pour cette concentration soit la plus élevée des trois : 105 N, 111 N et 108 N pour 5 %, 3 % et (I) respectivement.

Les adjuvants améliorent les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci. Différentes études [2,50-55] s'intéressent à l'effet des adjuvants au jeune âge du béton et en particulier lors de la phase de coffrage : elles se concentrent sur les propriétés rhéologiques du matériau, ses propriétés vis-à-vis de la durabilité ou encore sa poussée contre la paroi de coffrage et non la facilité à décoffrer. Bouharoun et al. [2] mettent en évidence que le comportement du béton frais à l'interface béton/coffrage est différent selon la concentration en superplastifiant et la nature de l'huile de décoffrage. Leurs résultats indiquent que l'ajout d'adjuvant modifie l'organisation des couches d'interface béton/coffrage en fonction de l'huile (minérale ou végétale) utilisée. Les propriétés lubrifiantes, et en particulier les contraintes de frottement, ne sont pas significativement modifiées avec l'ajout de superplastifiant, quelle que soit sa concentration et le type d'huile utilisée : minérale ou végétale.

Ortega et al. [56] rapportent que la chitine, un biopolymère, introduit à différentes concentrations en poids de ciment diminue la topographie de la surface cimentaire (Sq). Le paramètre de rugosité est mesuré par microscopie à force atomique sur une aire de 1 × 1 μm². Pour une hydratation de 24 h dans une solution à base d'ions sulfate à 20 °C, le paramètre Sq chute à 88 ± 11 nm pour une concentration à 0,5 % de chitine et 32 ± 5 nm pour une concentration à 1,3 %, quand il est à 139 ± 11 nm pour les surfaces cimentaires sans chitine. Bien que les conditions de cure et de mesures soient différentes, la réduction de Sq est comparable dans les deux études pour une concentration à 3 % de bioadjuvant et de 0,5 % et 2,1 % de chitine. En effet, le paramètre Sq peut diminuer de 33,4 % pour une pâte avec 3 % de bioadjuvant par rapport à

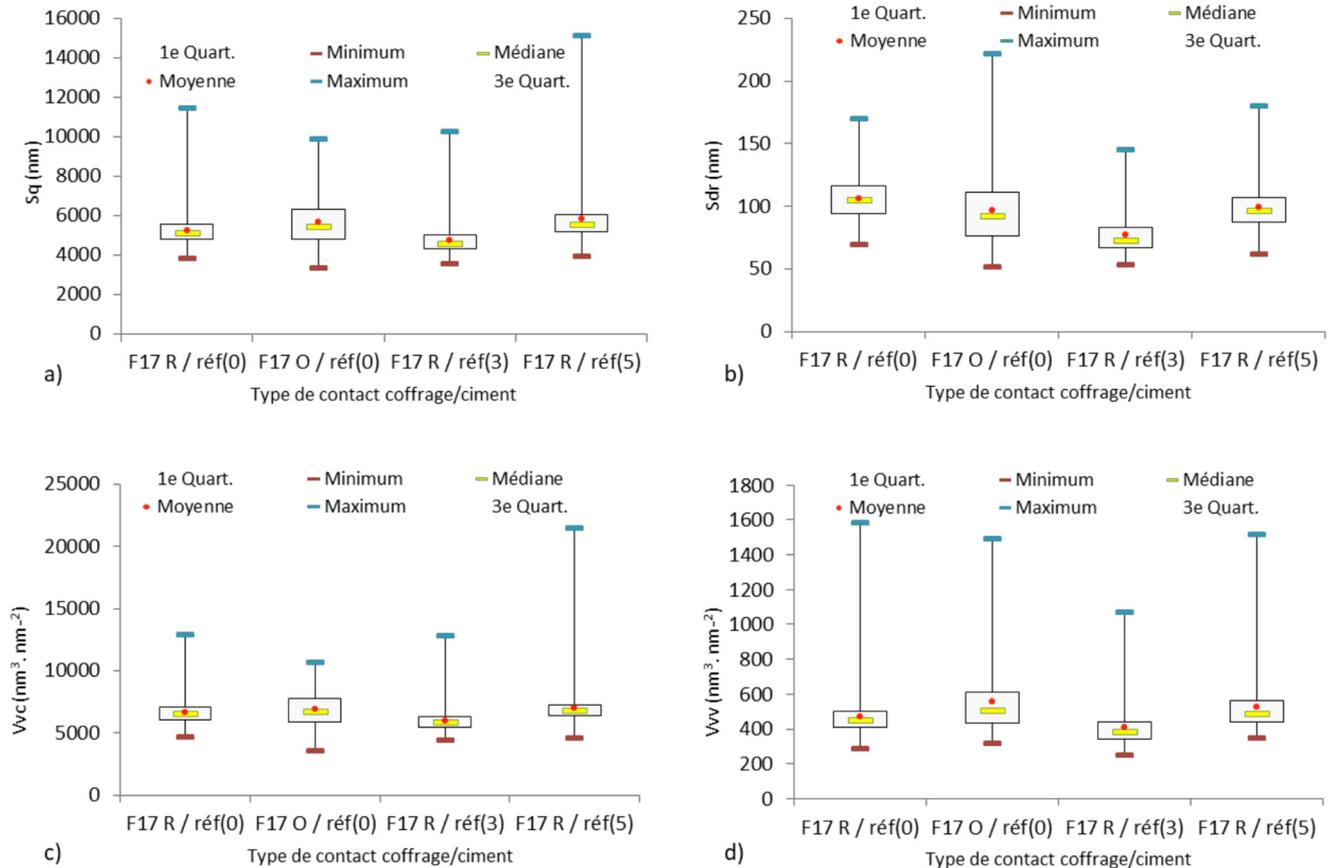


Fig. 11. Diagrammes en boîte des distributions de valeurs de paramètres d'état de surface obtenues pour différents types de contact coffrage/ciment et concentrations en bioadjuvant : a) paramètre Sq, b) paramètre Sdr, c) paramètre Vvc, d) paramètre Vvv.

une pâte sans bioadjuvant. Selon la concentration en chitine, il peut diminuer entre 22,7 % et 48,7 % (0,5 % de chitine), 71,1 % et 82,0 % (1,30 %), et 1,6 % et 42,7 % (2,1 %).

Il semble donc judicieux de combiner l'utilisation de coffrages de faible rugosité (polissage Intermédiaire) avec des formulations de bétons contenant le bioadjuvant. En effet, non seulement la force de décoffrage est équivalente à celle obtenue avec un agent démoulant, mais il est possible d'obtenir des surfaces plus résistantes à la biocolonisation comme cela a été mis en évidence dans le projet SEPOLBE [20,27,57–60]. De plus, ce bioadjuvant peut protéger les armatures de la corrosion [19,61] et conférer ainsi au béton des qualités de durabilité.

4 Conclusion

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du projet national à Fond Unique Interministériel, nommé ERGOFORM (ERGOnomic FORMwork – Système de coffrage auto-stable diminuant la pénibilité de chantier), qui vise à mettre au point un procédé de coffrage innovant. Dans ce but, l'analyse de l'influence de la composition d'un béton ainsi que l'influence de la qualité de surface d'une paroi coffrante sur l'adhérence ciment/coffrage a été effectuée.

Un dispositif expérimental original d'évaluation des efforts de décoffrage à 24 h a été conçu. Une surface coffrante en acier inoxydable a été étudiée et caractérisée par interférométrie optique à différents états de polissage. Les paramètres de surfaces ont été corrélés avec les performances au décoffrage. L'influence de l'adhésion mécanique liée à la rugosité de surface a été mise en évidence, les efforts au décoffrage augmentent avec la surface interfaciale développée, mise en évidence par le paramètre Sdr.

L'incorporation d'un bioadjuvant dans la pâte cimentaire a permis ensuite d'étudier l'influence du taux de ce produit sur les efforts au décoffrage. Le parement obtenu a également été analysé par microscopie interférométrique. Le choix du bioadjuvant est justifié par ces deux effets sur les bétons : une action modificatrice des propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci ainsi qu'une capacité inhibitrice de corrosion sur les armatures en acier. De plus, ce produit biosourcé confère aux surfaces cimentaires des propriétés inhibitrices de biocolonisation. À partir d'une concentration de 3 % incorporée à la pâte de ciment, le bioadjuvant pourrait favoriser une diminution des efforts de décoffrage par rapport à une surface coffrante de référence, dont l'état de surface correspond à celui du coffrage industriel. Le nombre d'essais étant, à ce jour, limité en raison d'une production de bioadjuvant en

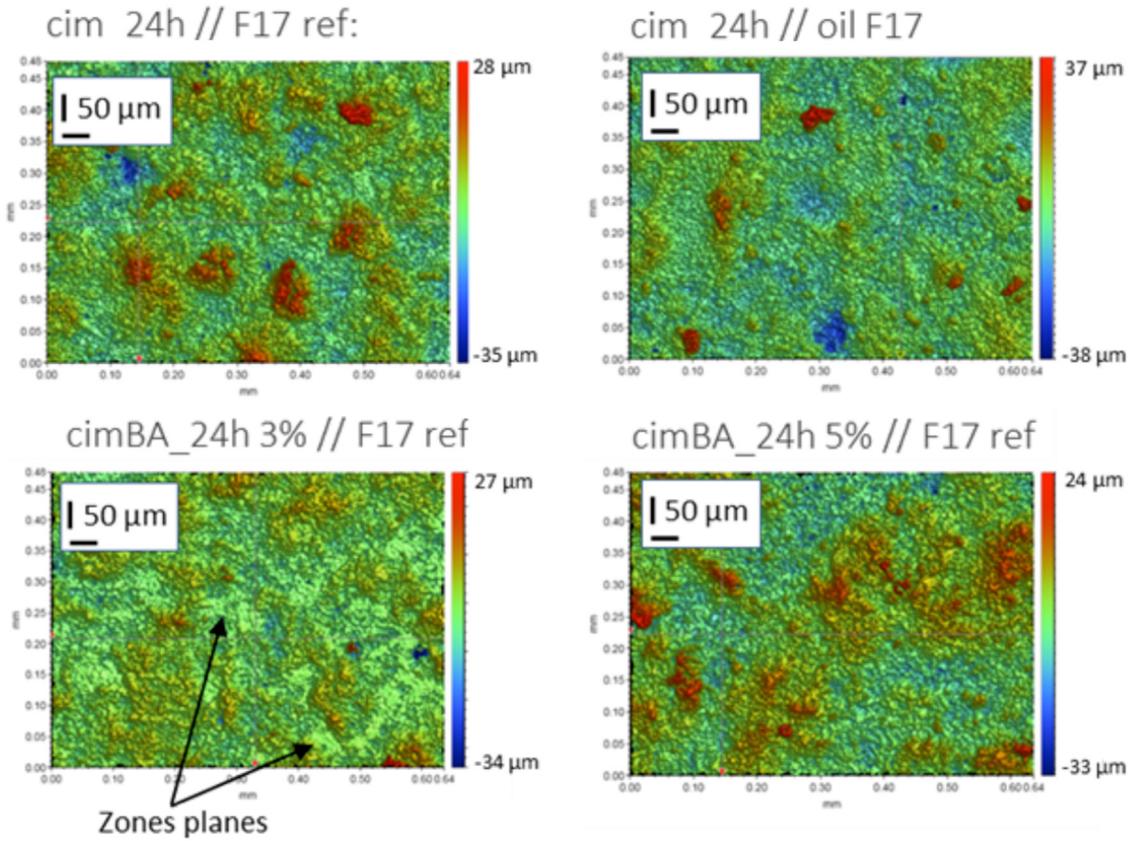


Fig. 12. Cartes par interférométrie de la topographie des surfaces cimentaires avec des concentrations de bioadjuvant à 0 %, 3 % et 5 % et en cure contre un coffrage huilé ou non.

Tableau 12. Classement des performances au décoffrage des différentes combinaisons « état de surface coffrage/composition de ciment ».

Type contact coffrage/ciment	F max (N)	% réduction de F par rapport à F17/réf. (0)
(a) F17/réf. (0)	140 ± 53	
F17M/réf (0)	25 ± 20	-48,4 ; -97,5
(b) F17oil/réf (0)	40 ± 27	-22,7 ; -93,1
F17/réf. (5)	105 ± 33	0 ; -62,3
(c) F17/réf. (3)	111 ± 27	0 ; -56,4
F17 I/ref (0)	108 ± 22	0 ; -55,2
(d) F17/réf. (1,5)	132 ± 24	0 ; -44,3

laboratoire restreinte. Aucune altération des performances au décoffrage n’est constatée avec l’utilisation du bioadjuvant dans la pâte de ciment.

Il apparaît ainsi qu’une optimisation des paramètres de géométrie de surface et de composition de béton permette d’obtenir des efforts au décoffrage réduits par rapport à une surface de référence et pouvant s’approcher de ceux obtenus avec les agents de démoulages classiquement appliqués sur les coffrages. Ces premiers résultats ouvrent donc des perspectives intéressantes pour améliorer les performances environnementales des bétons en évitant

l’utilisation des huiles de décoffrage et en améliorant les propriétés de durabilité des structures grâce à l’utilisation d’adjuvants biosourcés.

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.

References

1. INRS, TutoPrév’ Pédagogie BTP 2018, 4459 p, 2018
2. S. Bouharoun, P. de Caro, I. Dubois, C. Djelal, Y. Vanhove, Effect of a superplasticizer on the properties of the concrete/oil/formwork interface, *Construct. Build. Mater.* **47**, 1137–1144 (2013)
3. L. Libessart, C. Djelal, P. de Caro, Influence of the type of release oil on steel formwork corrosion and facing aesthetics, *Construct. Build. Mater.* **68**, 391–401 (2014)

4. Y. Vanhove, C. Djelal, A. Magnin, Prediction of the lateral pressure exerted by self-compacting concrete on formwork, *Mag. Concrete Res.* **56**, (2004)
5. M. Martin, N. Migeotte, C. Goffinet, L. Courard, F. Michel, Le béton apparent : influence de l'état du moule sur l'aspect des surfaces, in: *Compte-Rendu des Journées Scientifiques du (RF) 2B*, 2009
6. G. Lemaire, G. Escadeillas, E. Ringot, Evaluating concrete surfaces using an image analysis process, *Construct. Build. Mater.* **19**, 604–611 (2005)
7. J. De Brito, R. Dos Santos, F.A. Branco, Evaluation of the technical performance of concrete vegetable oil based release agents, *Mater. Struct.* **33**, 262–269 (2000)
8. E. Gueit, E. Darque-Ceretti, P. Tintillier, M. Horgnies, Influence de tensioactifs sur l'hydratation du ciment à l'interface béton/coffrage, *Matériaux*, 9 (2010), ISBN: 978-2-9528-1403-4. <hal-00578472>
9. M. Horgnies, Réactivité des surfaces de béton. Techniques de l'ingénieur matériaux : résistance à la corrosion et au vieillissement, Base documentaire: TIB373DUO, 2014
10. L. Courard, C. Goffinet, N. Migeotte, M. Martin, J. Pierard, V. Polet, Influence of the reuse of OSB and marine plywood formworks on concrete surface aesthetics, *Mater. Struct.* **45**, 1331–1343 (2012)
11. N. Spitz, N. Coniglio, M. El Mansori, A. Montagne, S. Mezghani, Quantitative and representative adherence assessment of coated and uncoated concrete-formwork, *Surf. Coat. Technol.* **352**, 247–256 (2018)
12. N. Bur, S. Roux, L. Delmas, Y. Géraud, F. Feugeas, Porosité des mortiers et bioréceptivité, *Matériaux & Techniques* **98**, 31–40 (2010)
13. [S.N.] : L'adhérence du béton au coffrage, *Bulletin du ciment*, **38**(8), 1–8 (1970)
14. [S.N.] : Décollement de la pellicule de ciment, *Bulletin du ciment*, **37**(22), 1–8 (1969)
15. L. Libessart, P. de Caro, C. Djelal, I. Dubois, Correlation between adhesion energy of release agents on the formwork and demoulding performances, *Construct. Build. Mater.* **76**, 130–139 (2015)
16. A. Mazkewitsch, A. Jaworski, The adhesion between concrete and formwork, in: Sasse H.R., ed., *Adhesion between polymers and concrete/Adhésion entre polymères et béton : Bonding protection repair/Revêtement protection réparation*, Springer, Boston, MA, USA, 1986, pp. 67–72
17. J. Młodecki, Adhesion forces of polymer modified concrete and plain concrete to steel in moulds and in reinforced concretes, in: Sasse H.R., ed., *Adhesion between polymers and concrete/Adhésion entre polymères et béton : Bonding protection repair/Revêtement protection réparation*, Springer, Boston, MA, USA, 1986, pp. 55–63
18. H. He, Analyse de l'effet d'un adjuvant biosourcé pour élaborer des matériaux cimentaires plus éco-respectueux, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2015
19. S. Chakri, P. David, I. Frateur, et al., Effet de la composition chimique de la solution interstitielle de bétons jeunes sur la passivation d'un acier doux, *Matériaux & Techniques* **103**, 209 (2015)
20. C. Munzer, Étude de l'action d'un bioadjuvant aux substances extracellulaires sur la microstructure et les caractéristiques de surface de pâtes cimentaires pour des bétons plus éco-respectueux, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2016
21. N. Serres, H. He, T. Meylheuc, F. Feugeas, Influence of a bioadmixture on standardized parameters of cementitious materials, in: *European Corrosion Congress (EUROCORR 2016)*, 15 p, 2016
22. J. Cognard, *Science et technologie du collage*, 1^{re} éd., Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000
23. D. Maugis, Adhesion of solids: Mechanical aspects, in: *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*, CRC Press, 2000
24. AFNOR, Norme européenne NF EN ISO 25178-2 – Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : surfacique – Partie 2 : Termes, définitions et paramètres d'états de surface, 2012
25. M. Miller, C. Bobko, M. Vandamme, F.-J. Ulm, Surface roughness criteria for cement paste nanoindentation, *Cement Concrete Res.* **38**, 467–476 (2008)
26. C.Y. Poon, B. Bhushan, Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler, *Wear* **190**, 76–88 (1995)
27. K. Ben Ahmed, Étude 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
28. . Sadowski, D. Stefaniuk, The effect of surface treatment on the microstructure of the skin of concrete, *Appl. Surf. Sci.* **427**, 934–941 (2018)
29. R. Deltombe, K.J. Kubiak, M. Bigerelle, How to select the most relevant 3D roughness parameters of a surface: Relevance of 3D roughness parameters, *Scanning* **36**, 150–160 (2014)
30. Y. Vanhove, Contribution à l'étude du frottement d'un béton autoplaçant contre une surface métallique – Application aux poussées contre les coffrages, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 2001
31. F. Blateyron, Mesures mécaniques. États de surface : la norme, *Mesures* **787**, 44–47 (2006)
32. F. Magnoni, A. Rannée, L. Marasinghe, B. El-Fouhaili, X. Allonas, C. Croutxé-Barghorn, Correlation between the scratch resistance of UV-cured PUA-based coatings and the structure and functionality of reactive diluents, *Progr. Organ. Coat.* **124**, 193–199 (2018)
33. H. Asgari, A. Ramezani pour, H.-J. Butt, Effect of water and nano-silica solution on the early stages cement hydration, *Construct. Build. Mater.* **129**, 11–24 (2016)
34. A. Bazzoni, Study of early hydration mechanisms of cement by means of electron microscopy, Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2014
35. E.M.J. Berodier, Impact of the supplementary cementitious materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration, Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2015
36. N. Hernandez, J. Lizarazo-Marriaga, M.A. Rivas, Petrographic characterization of Portlandite crystal sizes in cement pastes affected by different hydration environments, *Construct. Build. Mater.* **182**, 541–549 (2018)
37. E. Gueit, Coloration superficielle du béton frais via l'agent de décoffrage : comparaison avec la technique de peinture à fresque, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012
38. G. Arliguie, J. Grandet, J.P. Ollivier, Orientation de la portlandite dans les mortiers et bétons de ciment Portland : influence de la nature et de l'état de surface du support de cristallisation, *Mater. Struct.* **18**, 263–267 (1985)

39. S. Galmarini, Atomistic simulation of cementitious systems, Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013
40. C. Djelal, P. de Caro, L. Libessart, I. Dubois, N. Pébère, Comprehension of demoulding mechanisms at the formwork/oil/concrete interface, *Mater. Struct.* **41**, 571–581 (2008)
41. C. Labbez, I. Pochard, B. Jönsson, A. Nonat, C-S-H/solution interface: Experimental and Monte Carlo studies, *Cement Concrete Res.* **41**, 161–168 (2011)
42. S. Garrault-Gauffinet, Étude expérimentale et par simulation numérique de la cinétique de croissance et de la structure des hydrosilicates de calcium, produits d'hydratation des silicates tricalcique et dicalcique, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 1998
43. P. Mondal, Nanomechanical properties of cementitious materials, Thèse de Doctorat, Northwestern University, Illinois, USA, 2008
44. A. Peled, J. Castro, W.J. Weiss, Atomic force and lateral force microscopy (AFM and LFM) examinations of cement and cement hydration products, *Cement Concrete Compos.* **36**, 48–55 (2013)
45. T. Yang, B. Keller, E. Magyari, AFM investigation of cement paste in humid air at different relative humidities, *J. Physics D: Appl. Phys.* **35**, L25 (2002)
46. G.K. Glass, R. Yang, T. Dickhaus, N.R. Buenfeld, Backscattered electron imaging of the steel-concrete interface, *Corros. Sci.* **43**, 605–610 (2001)
47. A.T. Horne, I.G. Richardson, R.M.D. Brydson, Quantitative analysis of the microstructure of interfaces in steel reinforced concrete, *Cement concrete Res.* **37**, 1613–1623 (2007)
48. V. Baroghel-Bouny, Développement d'une approche globale, performantielle et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé) sur la base d'indicateurs de durabilité, Bilan et perspectives, 313 (2009), ISSN 1161-028X, ISBN 978-2-7208-2532-8, DOI/Crossref10.3829/erlpc.0a63-fr
49. C. Lors, F. Feugeas, B. Tribollet, Interaction matériaux-microorganismes : bétons, métaux, biodétérioration, EDP Sciences, 2017
50. A. Rahman, T. McQuaker, Application of ultra high performance concrete in expediting the replacement and rehabilitation of highway bridges, in: Proceedings of the First International Interactive Symposium on UHPC, 2016
51. N. Gaudillière, R. Duballet, C. Bouyssou, et al., Large-scale additive manufacturing of ultra-high-performance concrete of integrated formwork for truss-shaped pillars, in: Willmann J, Block P, Hutter M, Byrne K, Schork T, eds., *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*, Springer International Publishing, Cham, 2019, pp. 459–472
52. H. Figueiras, S. Nunes, J.S. Coutinho, J. Figueiras, Combined effect of two sustainable technologies: Self-compacting concrete (SCC) and controlled permeability formwork (CPF), *Construct. Build. Mater.* **23**, 2518–2526 (2009)
53. J.-C. Labuschagne, Formwork pressures by self-compacting concrete: A practical perspective, 183 p, 2018
54. T. Craipeau, T. Lecompte, F. Toussaint, A. Perrot, Evolution of concrete/formwork interface in slipforming process, in: Wangler T, Flatt RJ, eds., *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018*, Springer International Publishing, Cham, 2019, pp. 12–23
55. R.K. Dhir, M.J. McCarthy, S. Caliskan, M.K. Ashraf, Concrete pressure on formwork: influence of cement combinations and superplasticising admixtures, *Mag. Concrete Res.* **61**, 407–417 (2009)
56. E. Ortega, O. Rodríguez-Martínez, M. Figueroa-Labastida, et al., Long-term influence of chitin concentration on the resistance of cement pastes determined by atomic force microscopy, *Phys. Status Solidi A.* **213**, 3110–3116 (2016)
57. S. Roux, B. Tribollet, N. Serres, A. Lecomte, F. Feugeas, use of biopolymers to improve the reinforced concrete sustainability. *Restor. Build. Monuments* **19**, 163–170 (2013)
58. S. Roux, N. Bur, B. Tribollet, F. Feugeas, Comment améliorer la durabilité de bétons plus éco-respectueux grâce à des polymères bactériens, *Matériaux & Techniques* **99**, 573–580 (2011)
59. N. Serres, S. Braymand, F. Feugeas, Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment, *J. Build. Eng.* **5**, 24–33 (2016)
60. N. He Huan Serres, T. Meylheuc, F. Feugeas, Ouvrabilité et performances mécaniques de mortiers contenant un bioadjuvant à base de substances extra-cellulaires, *Matériaux & Techniques* **101**, 105 (2013)
61. F. Feugeas, M. Tran, S. Chakri, Bio-based admixture with substances derived from bacteria for the durability of concrete, in: Pacheco-Torgal F, Melchers RE, Shi X, Belie ND, Tittelboom KV, Sáez A, eds., *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, Woodhead Publishing, 2018, pp. 569–587

Citation de l'article : Calypso Chadfeau, Sayed Hashim Mohseni, Safiullah Omary, Vincent Steiner, Essia Belhaj, Christophe Fond, Françoise Feugeas, Influence d'un bioadjuvant sur l'adhésion du ciment sur parois coffrantes et évaluation de l'effet de la rugosité des parois coffrantes, *Matériaux & Techniques* **108**, 301 (2020)