Influence des énergies de surfaces des huiles de démoulage sur les performances de décoffrage.

Laurent Libessart*, * — Chafika Djelal* — Pascale De Caro ** — Isabelle Dubois*****

* *Laboratoire d'Artois Thermique Mécanique et Instrumentation, FSA, TechnoParc Futura, F-62400 Béthune*

c.djelal@wanadoo.fr; laurent.libessart@fsa.univ-artois.fr

** *LCA, UMR1010 – INRA/INP – ENSIACET, 118 route de Narbonne, 31077 Toulouse Cedex 04*

*** *CHRYSO S.A., Z.I. – 7, rue de l'Europe, 45300 Sermaises*

RÉSUMÉ. *Les agents de démoulage permettent d'assurer un décoffrage facile du béton. L'application des huiles sous forme de film doit être homogène sur la paroi du coffrage et doit résister au coulage du béton. L'adhérence ou l'affinité de l'huile avec le support a été étudiée par l'intermédiaire de l'énergie d'adhésion Solide/Liquide (ω_{SL}). Cette énergie a été calculée à l'aide de l'équation de Zisman qui fait intervenir l'angle de goutte et la tension superficielle Liquide/Vapeur.*

ABSTRACT. *The release agents make it possible to ensure an easy dismantling of the concrete. The oil's application in the form of film must be homogeneous on the surface of the formwork and must resist the casting of the concrete. The adherence or the affinity of oil with the support was studied via th Solid/Liquid energy adhesion This energy was calculated using the Zisman equation which utilizes the angle of drop and the surface tension Liquid/Vapour.*

MOTS-CLÉS *huile de démoulage, acidifiant, solvant, coffrage, rugosité, angle de goutte, tension superficielle Liquide/Vapeur, énergie d'adhésion*

KEYWORDS: *release agent, acidify, solvent, formwork, roughness, surface tension liquid/vapour., adhesion energy*

1. Introduction

De nos jours, les architectes sont de plus en plus exigeants et demandent des parements en béton irréprochables. L'aspect des parements est lié, à la composition du béton, à l'huile de démoulage, au coffrage et surtout au décoffrage. Il est donc nécessaire de contrôler celui-ci. Pour obtenir un décoffrage de qualité, un agent de démoulage est appliqué sur la surface du coffrage afin d'empêcher l'adhérence du béton. Cet agent doit également permettre une mise en œuvre du béton plus efficace tout en adhérant parfaitement au coffrage. En effet, l'huile ne doit pas être entraînée par le béton en pied de coffrage ce qui pourrait entraîner des défauts d'aspect sur le parement (poussiérage, arrachements, microbullage, points d'accroche).

L'adhérence ou l'affinité de l'huile avec le support a été étudiée par l'intermédiaire de l'énergie d'adhésion Solide/Liquide (ω_{SL}). Cette énergie d'adhésion a été déterminée à partir de l'équation de Zisman qui fait intervenir l'angle de goutte et la tension superficielle Liquide/Vapeur. Trois surfaces différentes ont été retenues pour cette étude : neuve (correspondant à un coffrage en début d'utilisation), usagée et polie. Ce dernier cas, prend en compte les coffrages usagées qui ont subit un polissage avant d'être réutilisée sur les chantiers. Suite à l'étude, il s'avère que l'affinité de l'huile sur le support constitue un critère incontournable pour prévoir la qualité du décoffrage et par conséquent pour maîtriser l'aspect des parements.

2. Caractéristiques des huiles de décoffrage et des surfaces de coffrage

2.1. *Les huiles de démoulage*

Les deux huiles de démoulage retenues pour cette étude appartiennent à deux familles différentes, une huile à base minérale M1 et une huile à base végétale V1.

L'huile M1 est un agent de démoulage différé prêt à l'emploi, sous forme liquide avec une coloration jaune pâle. Elle est composée d'une base minérale primaire avec l'addition d'un acidifiant et d'un agent anti-corrosion qui n'intervient pas dans l'étude. L'huile M1 de part la nature de sa base est peu biodégradable et peut donc provoquer à forte dose une pollution des nappes phréatiques. Par ailleurs, les maladies professionnelles liées au contact cutané ou à l'inhalation de gouttelettes d'huiles à base d'hydrocarbures sont répertoriées par les organismes de santé.

L'huile V1 est un agent de démoulage différé prêt à l'emploi. Elle se présente également sous forme liquide avec une coloration jaune paille. Elle comporte un acidifiant et un solvant. Elle est élaborée à partir de matières premières végétales pour un meilleur respect de l'environnement et pour la protection de l'utilisateur.

Pour comprendre comment agissent les différents composés sur les formulations d'huiles et les résultats en qualité de parement, nous avons élaboré des formulations types qui reprennent les constituants de base des formulations de référence.

Nous avons :

M1 : Formulation commerciale végétale

M0 : Base minérale complexe

M2 : M0 + acidifiant

M3 : M0 + solvant

V1 : Formulation commerciale minérale

V0 : Ester de pin complexe

V2 : V0 + acidifiant

V3 : V0 + solvant

	Huiles à base minérale				Huiles à base végétale			
Référence	M0	M1	M2	M3	V0	V1	V2	V3
Indice d'acide (mg KOH/g prdt)	IA <1	IA< 6	IA < 6	IA <1	IA <1	IA < 7	IA < 6	IA <1
Indice d'hydroxyde (mg KOH/g prdt)	0,0	0,0	0,0	IOH > 1	0,0	IOH > 1	0,0	IOH > 1
Densité	0,85	0,85	0,85	0,89	0,93	0,93	0,93	0,93
Viscosité à 20°C (mPa.s)	27,6	20,1	23,3	22,2	178,3	46,1	177,7	57,5

Tableau 1. *Caractéristiques des formulations étudiées*

L'indice d'acide est représentatif de la quantité d'acidifiant introduite. L'indice d'hydroxyle est fonction de la teneur en solvant.

Les mesures de viscosité des huiles ont été mesurées à l'aide d'un rhéomètre cône/plan (Libessart, 2006). A 20 °C, nous pouvons regrouper les valeurs des viscosités en 3 groupes :

- Les huiles à base minérales présentent des viscosités faibles comprises entre 20 et 28 mPa.s.
- Le second groupe est constitué de formulations végétales V0 et V2. Leur viscosité est beaucoup plus élevée comparée aux huiles minérales (7 fois supérieure).
- Le dernier groupe est représenté par les formulations V3 et V1. Les viscosités présentent une valeur 3 fois plus faibles que les deux formulations végétales précédentes. Les formulations V1 et V3 possèdent en effet un solvant qui abaisse leur viscosité.

2.2. *Les coffrages*

Le coffrage est un élément important du démoulage, il détermine la forme et l'aspect du produit fini en assurant la stabilité du béton frais jusqu'à son durcissement. Si celui-ci n'est pas correctement entretenu, des défauts apparaîtront sur le parement. De plus, la nature du coffrage détermine le choix du produit de décoffrage. Les coffrages utilisés en préfabrication et sur chantier sont confectionnés

en acier E24, c'est pourquoi les échantillons de coffrage utilisés pour notre étude ont été réalisés dans le même acier (OUTINORD).

La rugosité des surfaces a été mesurée. En effet, Djelal (1991) a montré que ce paramètre est important car il intervient directement sur le comportement des matériaux présents à l'interface.

Les paramètres (Figure 1) retenus pour l'évaluation de la rugosité sont :

Ra moyenne arithmétique des écarts du profil par rapport à la ligne moyenne.

Rp profondeur moyenne sur une longueur d'évaluation

Rt hauteur du pic à vallée maximale du profil

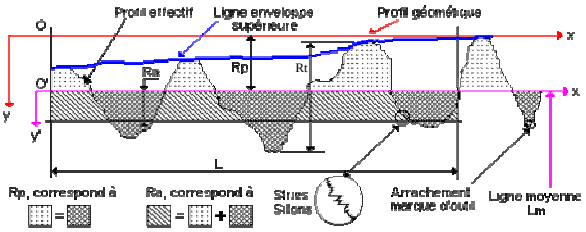


Figure 1. *Schéma explicatif des paramètres de rugosité*

La rugosité d'une surface est mesurée en déplaçant le long d'une ligne un palpeur suivant une direction parallèle à la surface moyenne à analyser. Les mesures sont réalisées au moyen d'un rugosimètre Surtronic 3+.

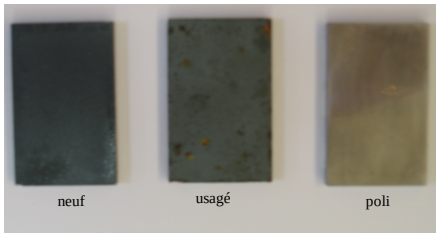
Des échantillons de coffrage de dimensions 5×3 cm (Figure 2) ont été fabriqués. Ces échantillons sont pris comme surfaces de référence pour le reste de l'étude. Trois surfaces ont été étudiées :

- Une surface **neuve :** prélevée sur la paroi d'un coffrage.

- Une surface **usagée** : obtenue après un léger ponçage à l'aide d'un papier de verre (gradient 600)**.** L'échantillon a ensuite été laissé 3 semaines à l'air libre afin pour accélérer le vieillissement.

- Une surface **polie** : obtenue par polissage avec du papier de verre (gradient 1200) pour obtenir une surface « miroir ».

Les caractéristiques des surfaces des différents échantillons sont données ci-dessous.



Plaque	Neuve	Usagée	Polie
Ra (µm)	1,3	1	0,1
Rp (µm)	4,3	5,7	0,03
Rt (µm)	8,4	11,8	0,1

Figure 2. *Echantillons de paroi de coffrage et leurs caractéristiques*

Les profils de rugosité sont présentés Figure 3 et 4.

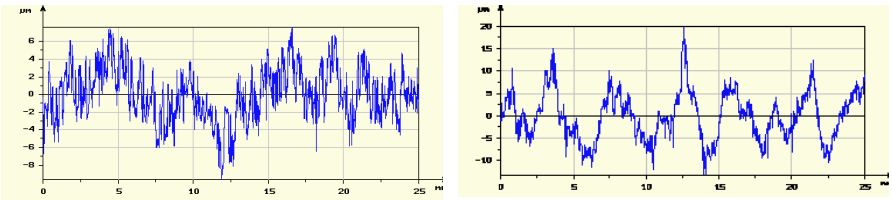


Figure 3. *Profil de rugosité des échantillon neuf et usagé*

Le profil pour l'échantillon de référence neuf présente des sillons serrés avec un Rt moyen de 8 µm. L'ensemble du profil est homogène. Pour le profil de l'échantillon de référence usagé, les sillons sont élargis et plus profond. Le Rt est de 11 µm de moyenne.

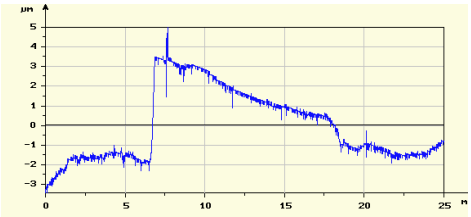


Figure 4. *Profil de rugosité de l'échantillon poli*

Le profil de l'échantillon de référence poli a des sillons très serrés et plat, le Rt du profil est de 0,1µm.

Les trois types de surfaces ont été définis pour pouvons donc maintenant nous intéresser à l'étude des énergies de surfaces.

3. Energies de surface

La valeur d'énergie d'adhésion liquide/solide est représentative de la force d'adhésion entre un liquide et son support. Les énergies d'adhésion sont déterminées d'après l'équation de Zisman (1963) :

$$\omega_{LS} = \gamma_{LV} \times (1 + \cos\theta) \qquad [1]$$

Pour déterminer l'énergie d'adhésion Solide/Liquide, il est nécessaire de mesurer l'angle de contact de l'huile sur les supports et la tension superficielle Liquide/vapeur de l'huile de démoulage

3.1. *Mouillabilité*

La mouillabilité est évaluée par la mesure des angles de contact (De Gennes, 1985). L'appareillage utilisé est un goniomètre (DIGIDROP). Il est constitué d'une camera, d'une source lumineuse, d'un écran de visualisation, d'un plateau et d'un piston motorisé. La goutte formée par la seringue est déposée sur le support de rugosité connue.

Après contact de la goutte avec le support, une photo se déclenche, la mesure de l'angle se fait à l'aide d'un logiciel et d'un système d'acquisition.

Le dépôt de la goutte d'huile sur le support est contrôlé automatiquement. Un angle de contact faible définit un pouvoir mouillant élevé (Palasantzas et al, 2001). L'angle dépend également de la nature du support et des conditions opératoires (Chappuis, 1974).

3.1.1. *Résultats*

Les mesures d'angles de contact ont été effectuées sur les trois échantillons à température et à humidité ambiante (T = 20°C). L'incertitude de mesure est de +/- 0,5°. Les résultats sont présentés tableau 2.

	Huiles à base minérale				Huiles à base végétale			
Référence	M0	M1	M2	M3	V0	V1	V2	V3
neuf (°)	20,8	19,0	19,0	17,7	36,2	32,4	34,8	25,8
usagé (°)	29,0	27,8	28,1	27,5	39,0	34,0	38,1	29,1
poli (°)	21,5	23,8	24,4	18,1	36,1	27,0	38,9	22,7

Tableau 2. *Valeurs des angles de goutte*

3.1.2. *Analyse*

- *Les huiles à base minérale*

Les résultats obtenus pour les quatre huiles minérales sont très proches, les angles moyens trouvés sont de 19° pour la plaque neuve, de 28° pour la plaque usagée et de 22° pour la plaque polie. Les mesures d'angle de goutte réalisées par Lemaire (2003) sur un support métallique à 20°C, donnent des valeurs comprises entre 22 et 27° pour des huiles minérales. Les valeurs, qu'il a obtenues, sont proches des nôtres. L'huile M3 (avec solvant) possède des valeurs d'angles de goutte les plus faibles pour les trois supports. Il semble donc que le solvant contenu dans cette huile ait tendance à abaisser la mouillabilité (-2°) des huiles à base minérale.

- *Les huiles à base végétale*

Nous observons une variation des valeurs plus importante pour cette catégorie d'huile. La formulation V3 présente les angles les plus bas pour les trois supports. Les huiles V0 et V2 ont le même ordre de grandeur. L'huile V1 présente des valeurs intermédiaires. L'impact du solvant sur l'angle de goutte est plus prononcé avec les formulations à base végétale (perte de 9°).

- *Influence de l'état de surface de la plaque*

La plaque usagée donne les mesures d'angles les plus élevées quelque soit la nature de l'huile, avec une augmentation de 9° pour les huiles à base minérale et de 3° pour les huiles à base végétale. En polissant la plaque usagée, nous nous rapprochons des mouillabilités de la plaque neuve.

3.2. *Tension superficielle Liquide/Vapeur*

La tension superficielle Liquide/Vapeur est la tension qui existe à la surface de séparation de deux milieux (Lavielle, 1990). Cette tension provient du fait que les molécules, en limite de séparation, ne sont pas soumises aux mêmes forces de Van der Waals de la part de toutes leurs voisines. C'est la résultante des forces s'exerçant sur une molécule de la surface et dirigée vers l'extérieur d'un liquide.

3.2.1. *Mode opératoire - Résultats*

Les mesures de tension superficielle L/V sont réalisées au moyen de la lame de Wihelmy. La lame de platine est fixée sur une balance de Kahn. La lame doit être placée à environ 5 mm de la surface du liquide à mesurer. La mise à zéro est effectuée dès que la lame touche la surface du liquide. La lame commence une phase d'immersion à une vitesse et à une profondeur données. Le logiciel calcule ensuite la tension superficielle L/V du liquide. Le tensiomètre utilisé est un GBX 3S. La précision de mesure est de ± 0,2 mN/m.

Les résultats des mesures réalisées par la lame de Wilhelmy sont donnés tableau 3.

	Huiles à base minérale				Huiles à base végétale			
Référence	M0	M1	M2	M3	V0	V1	V2	V3
γ_L à 21°C (mN/m)	31,6	32,0	31,9	31,7	36,0	32,7	36,1	33,8

Tableau 3. *Tensions de surface mesurées avec la lame de Wilhelmy*

3.2.2. *Analyse*

- *Les huiles à base minérale*

Les résultats obtenus sont semblables pour les quatre formulations. Le solvant n'influence pas la tension superficielle Liquide/Vapeur.

- *Les huiles à base végétale*

La présence de solvant abaisse les valeurs de tensions superficielles L/V. Les huiles à base végétale comportant un solvant (V3 et V1) ont des valeurs de tensions superficielles Liquide/Vapeur plus faibles que pour les formulations V0 et V2.

Par ailleurs, les résultats montrent que l'acidifiant n'a pas d'influence sur la tension superficielle Liquide/Vapeur. Nous savons que les huiles à base végétale ont un caractère hydrophobe moins prononcé que les huiles à base minérale dû aux propriétés amphiphile des fonctions esters à longues chaînes. L'écart, des tensions superficielles Liquide/Vapeur, reste toutefois assez faible entre les deux familles d'huiles.

Nous disposons alors des données nécessaires au calcul de l'énergie d'adhésion Liquide/Solide.

3.3. Calcul de l'énergie d'adhésion Liquide/Solide

L'énergie d'adhésion calculée à partir de l'équation de Zisman [1] est donnée tableau 4 pour les 3 surfaces étudiées. Une variation d'énergie d'adhésion de +/- 2 mN/m est jugée significative.

	Huiles à base minérale				Huiles à base végétale			
ω_{SL} (mN/m) Huiles	M0	M1	M2	M3	V0	V1	V2	V3
Plaque neuve	61,1	62,3	62,1	61,9	65,1	60,3	65,8	64,2
Plaque usagée	59,3	60,3	60,1	59,8	64,0	59,8	64,5	63,3
Plaque polie	61,0	61,3	61,0	61,8	65,1	61,8	64,2	65,0

Tableau 4. *Valeurs des énergies d'adhésion pour les trois types de support*

4. Discussion

Les énergies d'adhésion Solide/Liquide relative à la plaque usagée sont les plus basses. L'huile a une bonne mouillabilité « apparente » avec le support usagé de part sa rugosité mais son pouvoir d'adhésion est limité ce qui peut se traduire sur les chantiers par un entraînement de l'huile lors du coulage du béton. En polissant la surface, nous retrouvons des énergies plus importantes de même grandeur que pour le support neuf. Une comparaison est effectuée entre les énergies d'adhésion obtenues pour les huiles étudiées et les valeurs répertoriées pour des polymers (Benhayia, 1996). L'auteur des travaux a déterminé les énergies d'adhésion de deux types d'adhésifs sur différents supports. Pour un adhésif à base de copolymère à blocs styrénique sur un support acier, l'énergie d'adhésion s'élève à 54,6 mN/m. Pour un adhésif acrylique, on trouve$\omega_{A/S}$ = 78 mN/m. Les valeurs obtenues pour les huiles de décoffrage sont comprises entre les deux valeurs, nous pouvons donc conclure que les huiles de démoulage étudiées ont un comportement proche de celui d'un adhésif sur la surface du coffrage. La mise en œuvre du béton dans les coffrages en sera donc facilitée.

- Les huiles à base minérale

Les huiles à base minérale présentent les valeurs d'énergie d'adhésion les plus basses, comprises entre 59 et 62 mN/m pour les trois supports. Les valeurs des quatre formulations sont du même ordre de grandeur.

- Les huiles à base végétale

Globalement, les huiles à base végétale ont une meilleure adhésion que les huiles à base minérale avec des écarts tout de même assez faibles. Les valeurs sont comprises entre 60 et 66 mN/m. Nous pouvons regrouper les huiles V3, V2, V0 qui possèdent les énergies d'adhésion les plus élevées (supérieures à 63 mN/m). Le comportement de l'huile V1 se rapproche de celui des huiles à base minérale. L'huile à base végétale V2 avec un indice d'acide moyen possède l'énergie d'adhésion la plus importante, pourtant, son angle de contact est parmi les plus élevés. Or, l'angle de contact rend compte davantage de la capacité de l'huile à s'étaler sur le support tandis que l'énergie d'adhésion est représentative de la force de contact entre le liquide et le support.

5. Conclusion

Le solvant améliore la mouillabilité de l'huile sans altérer sa force d'adhésion quelle que soit la nature de la formulation. L'effet du solvant sur l'angle de goutte est davantage perceptible pour les huiles à base végétale. Le solvant diminue les valeurs de tension superficielle Liquide/Vapeur pour les huiles à base végétale. Par contre la combinaison du solvant et de l'acidifiant semble entraîner une baisse de l'énergie d'adhésion (V1). La plaque neuve et la plaque polie donnent les valeurs d'énergie

d'adhésion les plus élevées comparées à la plaque usagée. Il semble donc que le polissage améliore le niveau d'adhésion ce qui confirme que la surface altérée d'un coffrage amoindrie les performances d'un agent de démoulage. Malgré des valeurs de mouillabilité élevées, les huiles à base minérale ne présentent pas les énergies d'adhésion les plus élevées. En effet, les exigences en matière de mouillabilité (θ petit) sont importantes pour garantir un taux de recouvrement du support élevé. Mais un autre paramètre entre en jeu : une tension superficielle de l'huile élevée est favorable à l'énergie d'adhésion. Par conséquent, l'énergie d'adhésion s'avère donc un paramètre plus représentatif que l'angle de goutte pour juger de l'affinité de l'huile avec le support. La formulation V2 qui possède à la fois des caractéristiques de mouillabilité et d'adhérence favorables représente un bon compromis. Compte tenu des résultats obtenus, les huiles de démoulage étudiées conduisent à des niveaux de performances qui dépendent des caractéristiques décrites.

Nous remercions la société CHRYSO S.A. pour le financement de l'étude.

6. Bibliographie

Benyahia L., « Relations entre les propriétés rhéologiques et physico-chimique des polymères et leurs propriétés adhésives - Application à la peau », Thèse de doctorat de Grenoble, 1996

Chappuis J., Contribution à l'étude du mouillage – Application aux problèmes de lubrification, Thèse de doctorat de Lyon, 1974

De Gennes P.G. « Wetting: statics and dynamics », *Reviews of modern physics* vol 57 N°3 p 827-863

Djelal C., Analyse du phénomène de frottement des mélanges eau/argile concentrés contre des surfaces métalliques, Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 1991

Fiches Techniques Béton B6, Les coffrages de chantier

Lavielle L., Energie de surface des solides : Aspects théoriques et pratiques, Centre de Recherches sur la Physico-chimie des Surfaces Solides, 1990

Lemaire G., Contribution à la maîtrise de la qualité des parements de béton, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III, 2003

Libessart L., Influence des composées chimiques des agents de démoulage sur l'interface coffrage/béton – Impact sur l'esthétique des parements en béton, Thèse de doctorat de l'université d'Artois à Béthune, mars 2006

Palasantzas G., De Hosson J.Th., « Wetting on rough surfaces », *Acta Materialia,* vol 49, p 3533-3538, 2001

Zisman W.A. « Relation of the Equilibrium Contact angle to Liquid and Solid Constitution » p 1 – 51 (1963)