

Etude de la dynamique de mouillage et dé mouillage de polymères à l'état fondu pour l'élaboration de biocomposites

Study of dynamic wetting and dewetting phenomena with molten polymers for biocomposite processing

Monica Francesca Pucci¹, Benoît Duchemin², Moussa Gomina³ et Joël Bréard²

1 : C2MA, IMT Mines Alès, Université de Montpellier
6 avenue de Clavières 30319 Alès
e-mail : monica.pucci@mines-ales.fr

2 : LOMC, UMR 6294 Université du Havre
53 rue de Prony 76058 Le Havre
e-mail : benoit.duchemin@univ-lehavre.fr et joel.breard@univ-lehavre.fr

3 : CRISMAT, UMR 6508 ENSICAEN
6 Boulevard Maréchal Juin 14050 Caen
e-mail : moussa.gomina@ensicaen.fr

Résumé

Ce travail a pour objectif de calibrer un protocole de mesure permettant d'identifier les paramètres clés dans les phénomènes de dynamique de mouillage lors de la mise en oeuvre de composites. Pour valider la procédure, des matériaux modèles ont été étudiés : des films cellulotiques en tant que substrats, et des paraffines et polyéthylène glycols comme liquides. La procédure expérimentale a consisté à caractériser le substrat en termes de morphologie et de chimie de surface, en montrant qu'en première approximation on peut s'affranchir des hétérogénéités de surface. La caractérisation de liquides en fonction de la température et en fonction de la masse molaire a été ensuite analysée en prenant en compte l'état fondu des polymères. Les conditions de température et de masse molaire ont été ensuite considérées en dynamique de mouillage et demouillage. Les résultats ont bien été décrit par l'approche hydrodynamique pour un certain intervalle de valeur du nombre capillaire. Sur la base de ces modèles, des paramètres physiques ont été estimés, en précisant l'influence de la température et des longueurs de chaîne de polymères sur la dynamique de mouillage.

Abstract

The aim of this study was to set an experimental protocol in order to identify key parameters in wetting dynamics during liquid composite manufacturing. To validate the procedure, model materials were studied : cellulose films as substrates, and paraffins and polyethylene glycols as liquids. The experimental procedure consisted of characterizing the substrates in terms of morphology and surface chemistry, showing that, as a first approximation, it was possible to consider substrates as model surfaces without physico-chemical defects. The characterization of liquids as a function of temperature and molar mass was then performed, considering an additional issue : the molten state of polymers. Temperature conditions and molar mass were then considered in wetting and dewetting dynamic. The results were well described by the hydrodynamic approach for a range of capillary numbers. Using these models, physical parameters were estimated, explaining the influence of temperature and polymer chain lengths on wetting dynamics.

Mots Clés : mouillage, imprégnation, polymères fondus, biocomposites, élaboration

Keywords : wetting, impregnation, molten polymers, biocomposites, processing

1. Introduction

Un des enjeux majeurs de la mise en oeuvre de biocomposites à matrice thermodurcissable ou thermoplastique renforcée par des fibres végétales est la bonne infiltration du réseau fibreux par le polymère. L'un des mécanismes moteurs de l'imprégnation est la dynamique de mouillage guidée par le différentiel de pression ou la vitesse imposée au liquide, sous l'influence des forces capillaires. Ces effets capillaires dépendent des interactions physico-chimiques entre les fibres et le liquide, c'est-à-dire l'énergie de surface des fibres, la tension de surface du liquide, ainsi que la morphologie du renfort

fibreuse. Plusieurs travaux ont montré que lors de l'imprégnation, du fait de l'enchevêtrement complexe du réseau de fibres, l'infiltration du liquide se fait principalement à deux niveaux d'échelle d'espaces de pores : dans les espaces macropores entre les mèches (échelle mésoscopique), et dans les espaces micropores entre les fibres (échelle microscopique) [1]. Les fibres naturelles d'origine végétale comme celles de lin ont une morphologie ainsi qu'un état de surface hétérogène suivant leur longueur et d'une fibre à l'autre. Il est essentiel de prendre en compte cette variabilité dans l'étude du mouillage [2]. Dans la littérature le phénomène d'imprégnation est décrit en termes de rapport de forces capillaires et visqueuses, qui peuvent engendrer la formation de macro et micro vides selon la vitesse locale v du liquide, et d'autres paramètres tels que la viscosité du liquide η et sa tension de surface γ_L , définis dans le nombre capillaire Ca [3]. Pour comprendre les interactions renfort/polymère lors de l'imprégnation, il est donc nécessaire d'étudier ces paramètres caractéristiques de la dynamique de mouillage, qui vont influencer l'adhésion fibre/matrice. Des points importants restent encore inexplorés dans l'étude de la dynamique de mouillage appliquée à l'élaboration des composites, et concernent plus particulièrement l'influence de la température T sur l'imprégnation. Le polymère thermoplastique à une température supérieure à celle de sa température de fusion présente une tension de surface et une viscosité données. De plus, la masse molaire moyenne Mn (ou d'une chaîne de longueur moyenne) du polymère est également une variable à considérer [4]. Les effets de la température T et de la masse molaire Mn de différents polymères (à l'état fondu) sur la dynamique de mouillage ont donc été étudiés dans ce travail. Pour évaluer les effets de ces paramètres lors de l'imprégnation d'un renfort fibreux, et dans le cas spécifique d'un renfort en fibres végétales, il faut nécessairement passer par une étude de milieux solide et liquide "modèle", c'est-à-dire de substrats solides ayant une morphologie et une chimie de surface contrôlées et des polymères aux caractéristiques connues. Une étude complète de la dynamique de mouillage pour ce couple de matériaux, dans un environnement contrôlé, constitue une étape nécessaire pour une calibration du protocole de mesure qui pourra ensuite être appliqué aux fibres végétales.

Pour cette étude du mouillage dynamique, des films cellulotiques ont été choisis comme substrat modèle, associés à deux types de liquides modèles. L'huile de paraffine, qui est un liquide totalement mouillant à température ambiante, a été retenue pour déterminer l'effet de la température ; le polyéthylène glycol (PEG) qui est un polymère partiellement mouillant a été utilisé pour étudier l'effet de la masse molaire des polymères à l'état fondu, ce polymère étant disponible avec différentes longueurs de chaîne et diverses températures de fusion relativement faibles (entre 50°C et 70°C). La caractérisation de la surface des films a été menée en termes de morphologie et de chimie de surface ; les mesures des propriétés de mouillage des liquides ont porté sur la thermo-dépendance de la tension de surface, la viscosité et la densité. Ensuite les mesures de mouillage dynamique des films cellulotiques par les différents liquides ont été réalisées suivant plusieurs conditions de température et pour différentes masses molaires. Des modèles théoriques de dynamique de mouillage ont été appliqués et analysés selon leur domaine de validité [5]. Des grandeurs physiques ont ainsi été déterminées, permettant d'améliorer la compréhension de l'influence de ces différents paramètres sur la dynamique de mouillage. Les relations obtenues peuvent être comparées ou employées dans des modèles numériques décrivant respectivement la dépendance des angles de contact dynamique à la vitesse de la ligne de contact mobile [6], ou l'étude multi-échelle d'un écoulement en milieux poreux. Cette étude de dynamique de mouillage avec des matériaux modèles constitue une calibration du protocole de mesure qui pourra ensuite être appliquée aux fibres végétales.

2. Théorie de la dynamique de mouillage

La dynamique de mouillage décrit le mouvement de la ligne de contact (ou ligne triple) qui avance ou recule sur la surface d'un substrat solide avec une certaine vitesse v , en formant des angles dynamiques θ_d respectivement d'avancée (θ_a) ou de reculée (θ_r). Autrement dit, on parle de dynamique d'avancée quand la ligne de contact se déplace vers la région de solide sec, en revanche la dynamique de reculée

se réfère au cas où la ligne triple se déplace vers la région de solide mouillé. Les angles d'avancée et de reculée dépendent de la vitesse v de la ligne de contact. Dans le cas idéal d'une surface lisse (sans défauts morphologiques) et homogène chimiquement, l'angle de contact à l'équilibre θ_e est compris entre ces deux valeurs, θ_a et θ_r , tous deux fonctions de v . Dans le cas réel, les surfaces présentent des défauts physiques et chimiques pour lesquels il n'existe pas une seule valeur d'angle de contact à l'équilibre. En effet, pour une vitesse nulle, il y aura un hystérésis d'angle avec une valeur minimale en avancée définie comme angle statique d'avancée $\theta_{a,s}$ et une valeur maximale en reculée définie comme angle statique de reculée $\theta_{r,s}$ (Fig.1).

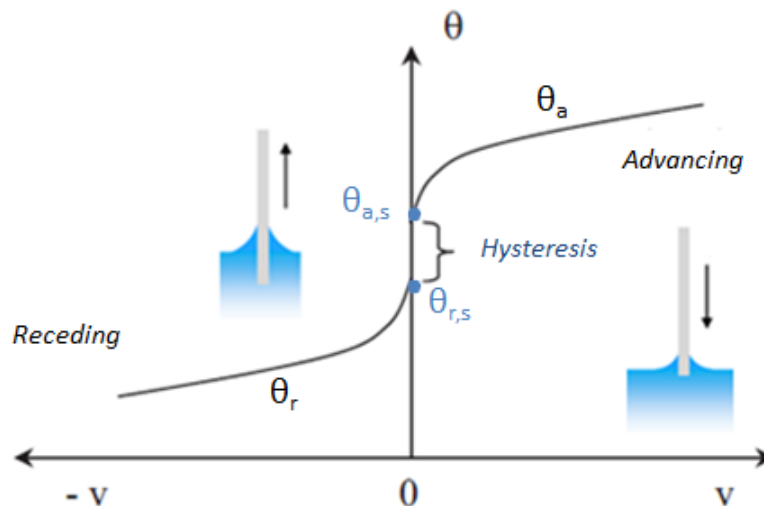


Fig. 1. Allure typique de l'angle de contact θ en fonction de la vitesse v .

A l'équilibre et dans le cas idéal, on parle de *mouillage total* quand l'angle d'équilibre θ_e est nul et que le liquide s'étale complètement sur le substrat. Au contraire, on parle de *mouillage partiel* quand l'angle de contact à l'équilibre θ_e est non nul et le liquide reste sous forme d'une goutte sur la surface. Une autre distinction importante dans la terminologie du mouillage est faite pour les régimes de dynamique de mouillage. Ils existent deux cas de mouillage dynamique : *forcé* et *spontané*. La dynamique de mouillage est forcée quand on impose au système une force externe telle qu'un différentiel de pression ou une vitesse qui cause le mouvement du liquide sur la surface. Un exemple de mouillage forcé dans le domaine des composites est un processus d'ensimage de fibres par immersion et retrait dans un bain liquide (Fig. 2-a). En régime spontané, il n'y a pas de force externe imposée et le phénomène dynamique n'est déterminé que par les effets capillaires. Un exemple typique est l'étalement spontané d'une goutte sur un substrat avant qu'il atteigne l'équilibre ou dans le cas de la montée capillaire spontanée de l'eau dans un renfort fibreux de lin (Fig. 2-b).

Indépendamment du régime de la dynamique de mouillage, le mouvement de la ligne de contact induit une dissipation d'énergie dans le système. Le système n'est plus dans une situation d'équilibre et la force capillaire motrice F_c sera équilibrée par un terme de dissipation dépendant de l'échelle d'observation à laquelle le problème est traité. A l'échelle macro-mésoscopique (de l'ordre des $mm - \mu m$) l'approche hydrodynamique (HD) considère que la dissipation est visqueuse, c'est-à-dire due exclusivement aux écoulements visqueux dans le volume de liquide loin de la ligne triple. En revanche, à l'échelle microscopique (de l'ordre des nm) la théorie de cinétique moléculaire (MKT) privilège la dissipation microscopique par un processus de déplacements moléculaires au voisinage de la ligne triple. Généralement, l'HD prédit bien les phénomènes de dynamique de mouillage à des Ca élevés, alors que la MKT décrit bien les phénomènes à des Ca faibles [7]. Cependant, ils existent dans la littérature des modèles combinés, qui considèrent simultanément les deux types de dissipation [8]. En général, tous les modèles aboutissent à une forme polynomiale où l'angle de contact dynamique est fonction de l'angle de contact à l'équilibre et du nombre capillaire Ca .

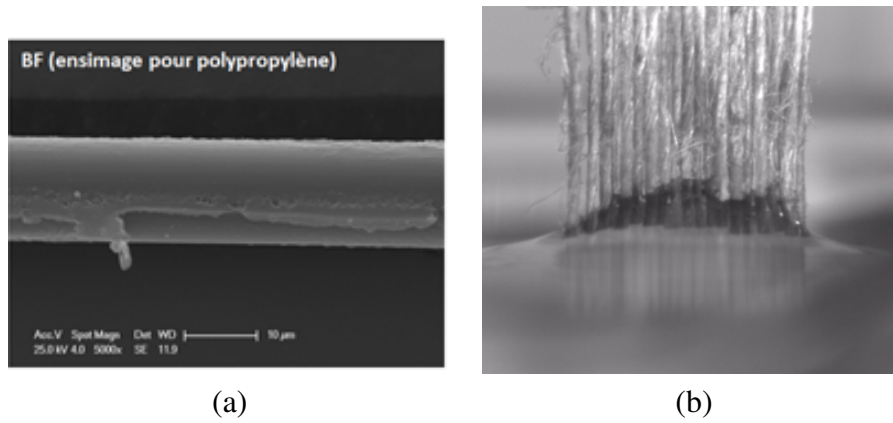


Figure 2. (a) Cliché MEB d'une fibre de basalte ensimée. (b) Photo d'une ascension capillaire d'eau dans un renfort en lin.

$$G(\theta_d, \theta_e) = \frac{\eta v}{\gamma_L} = Ca \quad (\text{Eq. 1})$$

où η et γ_L sont respectivement la viscosité et la tension de surface du liquide.

En particulier, l'approche HD est souvent décrit par une lois polynomiale d'ordre 3 (modèle de Cox-Voinov [9] [10]) :

$$\theta_d^3 - \theta_e^3 = 9 \ln \left(\frac{x_{max}}{x_{min}} \right) \frac{\eta v}{\gamma_{LV}} = 9 \Gamma Ca \quad (\text{Eq. 2})$$

x_{max} a été défini par De Gennes [11] comme une longueur de l'ordre de la longueur capillaire k^{-1} ($\approx 10^{-3} m$, définie en Eq. 3) au delà de laquelle les effets capillaires ne sont plus significatifs, x_{min} comme une longueur de l'ordre de la taille caractéristique d'une molécule a ($\approx 10^{-9} m$).

$$k^{-1} = \sqrt{\frac{\gamma_{LV}}{\rho g}} \quad (\text{Eq. 3})$$

où ρ est la densité du liquide et g l'accélération de gravité. Pour déterminer la taille caractéristique de la molécule a , dans la littérature il y a plusieurs modèles qui dépendent de la nature des molécules. Dans le cas de molécules comportant des enchevêtrements ou des repliements cette valeur est calculé à partir du rayon gaussien, en prenant en compte la longueur de Kuhn et le nombre de monomères [12].

En considérant que dans le cas réel il n'existe pas une valeur unique d'angle d'équilibre mais il y a toujours une hystérésis d'angle avec deux valeurs limites, l'angle statique d'avancée et l'angle statique de reculée, les lois prédisent une évolution des angles en avancée et en reculée en fonction du Ca . En mesurant à la fois les angles dynamiques et les angles statiques, le coefficient Γ devient le seul paramètre libre dans le modèle de Cox-Voinov :

$$\Gamma = \ln \left(\frac{x_{max}}{x_{min}} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

3. Matériaux et méthodes

3.1. Matériaux

Afin de valider le protocole de mesure, les substrats sont définis sur la base de films de cellulose. Ces films (NatureFlex TM23 NP) ont une épaisseur de $\frac{23}{4} \mu m$ et ont été fournis par Innovia films. Avant

d'être testés, les films ont été traités chimiquement avec de l'éthanol pour retirer le glycérol en surface et n'y laisser que de la cellulose. Successivement des échantillons de film avec les dimensions de $20 \times 10 \text{ mm}^2$ ont été retaillés. Les films ont été caractérisés en terme de morphologie et de chimie de surface. Les liquides choisis pour étudier le cas totalement mouillant ont été deux paraffines, les deux avec des caractéristiques similaires. Une paraffine (1) fournie par ACROS ORGANICS, ref. 171400010, et une paraffine (2) fournie par MERCK, ref. 107160. Ces liquides nous ont permis d'évaluer l'effet de la température T sur la dynamique de mouillage forcé. Dans un cas partiellement mouillant, et pour également évaluer la possibilité de faire des tests avec des polymères à l'état fondu, des polyéthylènes glycols (PEGs) ont été étudiés. Plus précisément trois PEGs avec respectivement des masses molaires M_n de 1450 g/mol (ref. 418040010, ACROS ORGANICS), 3350 g/mol (ref. 19760, DOW) et 10000 g/mol (ref. 10200251, ALFA AESAR) ont été caractérisés au delà de leur point de fusion.

3.2. Méthodes

Pour caractériser la morphologie de la surface des films celluloses, un microscope à force atomique (AFM Brüker INNOVA) a été utilisé en mode contact. Des mesures par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) par une sonde à réflectance totale atténuée (ATR) ont été menées pour évaluer la composition de surface. Des analyses par diffraction de rayons X (DRX) ont été aussi menées grâce au diffractomètre Pan'alytical X'pert powder avec un détecteur linéaire Pix'cel 1D.

Les mesures de viscosité en fonction de la température ont été obtenues au moyen d'un rhéomètre Physica MCR 501 (Anton Paar). Au préalable, des tests rhéométriques ont été menés en variant le taux de cisaillement pour vérifier que, dans l'intervalle de vitesse considéré, les liquides étudiés avaient un comportement newtonien.

Les mesures de tension de surface en fonction de la température ont été menées par méthode tensiométrique à goutte pendante (Fig. 3), grâce à un tensiomètre DSA100 (Krüss) qui permet d'effectuer des tests de la température ambiante à 400°C , c'est pourquoi cette méthode apparait comme la plus fiable pour mesurer la tension de surface de polymère à l'état fondu. Les images de gouttes pendantes sont capturées par la caméra intégrée au système, puis traitées via le logiciel Drop Shape Analysis 1.92.1.1. Le logiciel calcule directement la tension de surface grâce au profil de la goutte, en connaissant le diamètre de l'aiguille et la densité du liquide, par intégration numérique de l'équation de Laplace. Pour connaître la densité en fonction de la température, des tests via la méthode de la goutte posée ont également été menés grâce au DSA100 (Fig. 4). Des images des gouttes posées sur des lames en verre ont été capturées et le volume de chaque goutte a été calculé grâce au logiciel intégré. La masse de la goutte a ensuite été mesurée.

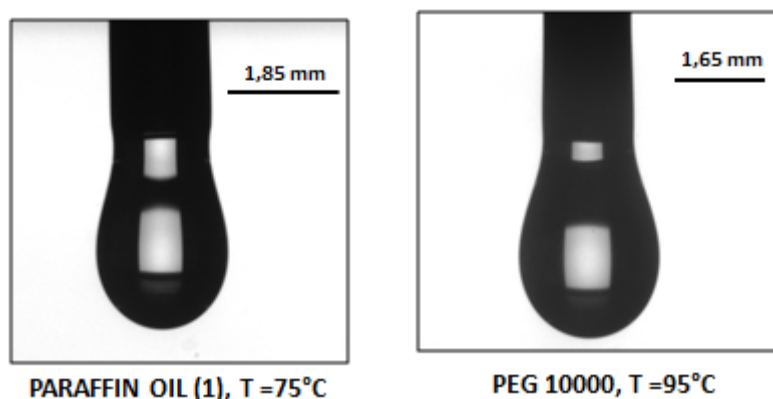


Figure 3. Images de goutte pendante pour la paraffine (1) et le PEG 10000 en température.

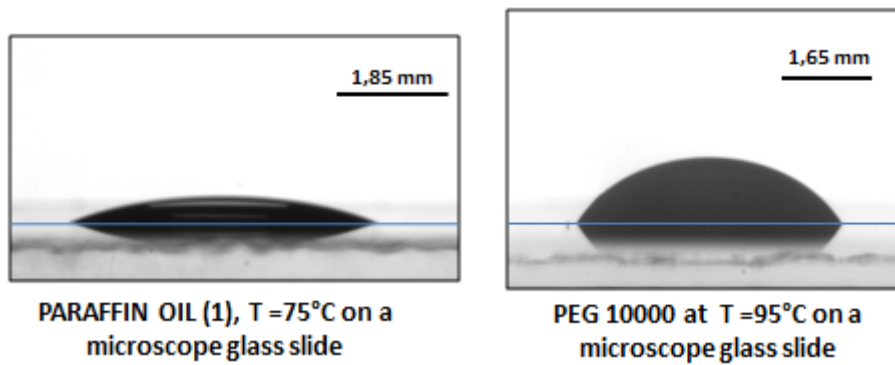


Figure 4. Images de goutte posée pour la paraffine (1) et le PEG 10000 en température.

Les tests de dynamique de mouillage forcé ont été menés avec la microbalance K100SF (Krüss) via la méthode en pesée de Wilhelmy. Ce tensiomètre a une résolution de 10^{-7} g, ce qui permet de mesurer des masses de ménisque m très faibles comme celles se formant autour de fibres unitaires. A partir de la masse du ménisque, et donc la force capillaire détectée par le tensiomètre via le principe de Wilhelmy, les angles de contact ont été obtenus [13]. Une unité de température permet d'effectuer des mesures de mouillage dans l'intervalle de $T = 20-80^{\circ}\text{C}$. Pour les paraffines l'environnement des essais a été contrôlé à $T = 25, 50$ et 75°C , et pour les PEGs à 75°C . Les tests ont été menés à plusieurs vitesses en maximisant l'intervalle de variation jusqu'aux limites de la machine ($v = 0.1 \text{ mm/min} - 500 \text{ mm/min}$) pour avoir l'intervalle le plus grand de nombre capillaire possible ($Ca \approx 10^{-5} - 0.1$). Trois tests ont été menés pour chaque condition de température et de vitesse imposée. Lors de l'immersion on aura une mesure d'angle d'avancée et lors du retrait celle de l'angle de reculée. La profondeur d'immersion a été fixée à 5 mm. Après immersion (avant la phase de retrait) une période statique de 120 secondes a été imposée au système (l'angle statique d'avancée peut être dérivé de cette mesure en statique). La Figure 5 montre des exemples de courbes tensiométriques obtenues à différentes vitesses. On remarque que pour les vitesses faibles, il n'y a pas d'hystérésis et que, comme attendu, plus la vitesse augmente plus l'angle d'avancée augmente. En revanche l'angle de reculée diminue et donc l'hystérésis augmente avec la vitesse.

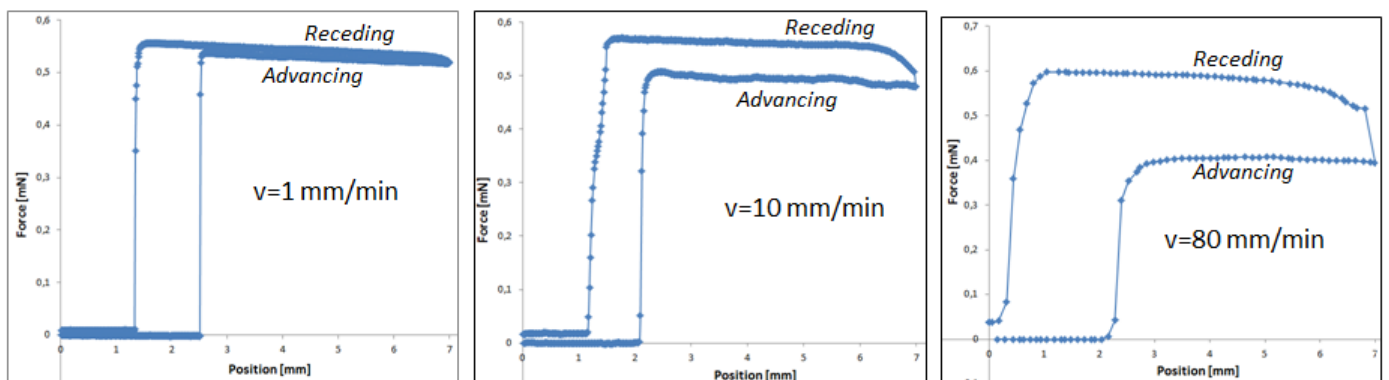


Figure 5. Exemple de courbes tensiométriques obtenues pour les films à différentes vitesses.

4. Résultats

Les Fig. 6 a et b montrent les valeurs de tension de surface mesurées. Il a été trouvé, en accord avec la littérature [4], que la tension de surface diminue linéairement en fonction de la température, pour tous

les liquides testés, polymères fondus inclus. En effet, les deux paraffines ont des tensions de surface similaires. La Paraffine (1) a une tension de surface plus élevée de même que sa viscosité (et densité mesurée). On voit également qu'il y a un effet significatif de la Mn sur la tension de surface mais également que la différence entre les PEGs devient plus importante lorsqu'on augmente la température.

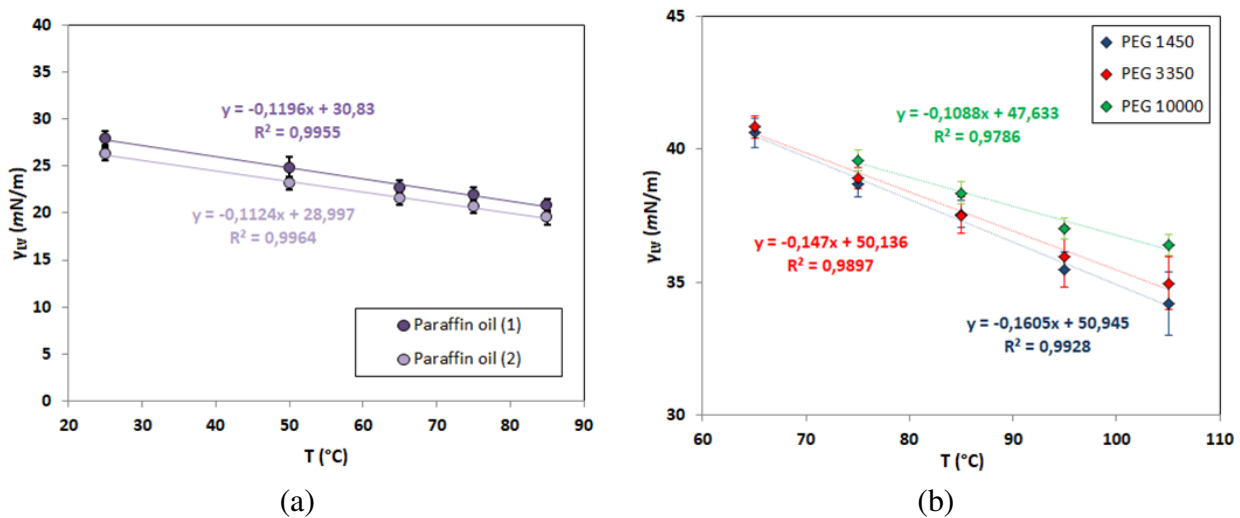


Figure 6. Allures des tensions de surface mesurées en fonction de la T (a) pour les paraffines. (b) pour les PEGs.

Lorsque toutes les données nécessaires à l'étude de la dynamique de mouillage sont obtenues, le modèle de Cox-Voinov (Eq. 2) peut être appliqué aux résultats expérimentaux. D'après la littérature, il a été observé que la MKT prédit bien les phénomènes de dynamique de mouillage pour des Ca faibles ($Ca < 10^{-4}$) [8]. Les nombres capillaires analysés pour les paraffines et les PEGs dépassent presque toujours ces valeurs de Ca du fait de leur rapport viscosité/tension de surface. En effet, la méthode de mesure des angles adoptée dans ces travaux nous permet de déterminer des angles dynamiques "apparents" définis à l'échelle macroscopique. Pour ces raisons, nous avons privilégié une modélisation de ces phénomènes dynamiques par une approche hydrodynamique (HD) afin d'en préciser le domaine de validité.

Les Fig.7 a et b montrent les résultats expérimentaux d'angles d'avancée à différentes températures en fonction de v et du Ca pour la paraffine (1) avec la loi de Cox-Voinov. On observe que la loi prédit bien les angles dynamiques pour des $Ca > 10^{-3}$, en accord avec la littérature [8]. Sur la base de ces analyses, des valeurs de Γ ont pu être estimées (Tab. 1). Ce paramètre est défini comme le logarithme du rapport de deux longueurs de coupure et dépend des caractéristiques des liquides (longueur capillaire et taille caractéristique de la molécule). Il existe cependant des controverses dans la littérature sur la signification physique de ce coefficient [14]. Ici, pour un liquide totalement mouillant tel que la paraffine, le coefficient Γ estimé via Cox-Voinov correspond bien aux valeurs trouvées dans la littérature pour du PDMS par exemple [11]. De plus, on a observé que Γ ne change pas lorsque la température augmente pour la paraffine. En effet, la température modifie la viscosité et la tension de surface (donc le Ca) mais ne change pas les propriétés du liquide telles que la taille caractéristique de la molécule. Par contre, pour les PEGs où on évalue la variation de Mn avec un paramètre supplémentaire correspondant au θ_e , on constate une diminution significative de Γ en fonction de la longueur de chaîne. Ces résultats seront discutés plus en détail lors de la communication orale.

5. Conclusion

L'application des modèles hydrodynamiques aux résultats de ces travaux nous amène à vérifier, pour la première fois, l'effet de paramètres très importants lors de la mise en œuvre de composites, la

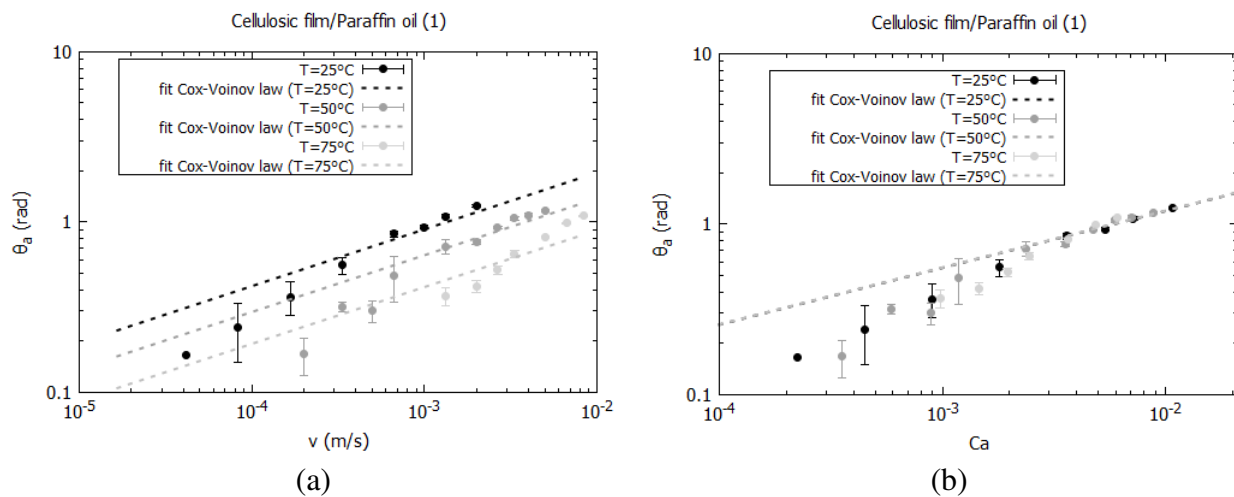


Figure 7. Fit des résultats d'angles d'avancée avec le modèle de Cox-Voinov pour la paraffine (1) (a) en fonction de v . (b) en fonction du Ca .

Paraffine (1)				
T (°C)	Γ	R^2	a_{theor} (m)	Γ_{theor}
25	19.0 ± 0.7	0.984	$7.967 \cdot 10^{-10}$	14.63
50	19.2 ± 1.1	0.965	$8.028 \cdot 10^{-10}$	14.57
75	19.2 ± 2.4	0.997	$8.124 \cdot 10^{-10}$	14.51

Tab. 1. Résultats des Γ obtenus grâce aux fits avec le modèle de Cox-Voinov pour $Ca > 10^{-3}$, le R^2 et la comparaison avec le Γ_{theor} (en considérant une taille théorique de la molécule a_{theor}) pour la paraffine (1).

température et la masse molaire (ou de la longueur de chaîne) du polymère, sur la dynamique de mouillage. Le paramètre clé dans ces modèles hydrodynamiques est le coefficient Γ qui définit une dissipation d'ordre visqueuse. Il est à noter que les paramètres Γ estimés grâce à la procédure mise en place dans ces travaux, correspondent très bien aux ordres de grandeur des coefficients décrits dans la littérature et les modèles semblent donc pouvoir s'appliquer à ces conditions de température et de masse molaire. Pour les paraffines, le coefficient Γ déterminé est en accord avec les valeurs théoriques en considérant la longueur capillaire et la taille caractéristique de la molécule.

L'emploi de ces données physiques dans des modèles numériques qui décrivent la dynamique d'écoulement constitue une des perspectives de ces travaux. La procédure pourra ainsi être appliquée à des fibres et des simulations numériques d'imprégnation de renforts, prenant en compte des paramètres déterminés à des échelles plus fines.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le partenaire DEPESTELE pour son aide et BpiFRANCE pour son soutien financier au programme de recherche partenariale TRAMPLIN.

Références

- [1] D. H. Lee, W. I. Lee, M. K. Kang « Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process », *Composites Science and Technology* Vol. 66 n° 16, pp. 3281–3289, 2006.
- [2] M. F. Pucci, P.-J. Liotier, D. Seveno, C. Fuentes, A. Van Vuure, S. Drapier « Wetting and swelling property modifications of elementary flax fibres and their effects on the Liquid Composite Molding process », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 97, pp. 31–40, 2017.

- [3] M. A. B. Abdelwahed, Y. Wielhorski, L. Bizet, J. Bréard « Bubble formation and transport in T-junction for application to Liquid Composite Molding : Wetting effect », *Journal of Composite Materials* Vol. 48 n° 1, pp. 37–48, 2014.
- [4] G. Cazaux « Faisabilité des procédés LCM pour l'élaboration de composites renfort continu à matrice thermoplastique polyamide », Ph.D. thesis, Université du Havre, 2016.
- [5] M. F. Pucci, B. Duchemin, M. Gomina, J. Bréard « Temperature effect on dynamic wetting of cellulosic substrates by molten polymers for composite processing », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 114, pp. 307–315, 2018.
- [6] V. Rougier, M. F. Pucci, M. Gomina, J. Bréard « Dynamic wetting of cellulosic substrates by model liquids. », in : JEMP 2018 French InterPore Conference on Porous Media, 8-10 octobre, 2018.
- [7] F. Brochard-Wyart, P. De Gennes « Dynamics of partial wetting », *Advances in colloid and interface science* Vol. 39, pp. 1–11, 1992.
- [8] J. G. Petrov, J. Ralston, M. Schneemilch, R. A. Hayes « Dynamics of partial wetting and dewetting in well-defined systems », *The Journal of Physical Chemistry B* Vol. 107 n° 7, pp. 1634–1645, 2003.
- [9] B. Cox « On driving a viscous fluid out of a tube », *Journal of Fluid Mechanics* Vol. 14 n° 1, pp. 81–96, 1962.
- [10] O. Voinov « Hydrodynamics of wetting », *Fluid dynamics* Vol. 11 n° 5, pp. 714–721, 1976.
- [11] P.-G. De Gennes, F. Brochard-Wyart, D. Quéré, *Capillarity and wetting phenomena : drops, bubbles, pearls, waves*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [12] R. Lhermerout « Mouillage de surfaces désordonnées à l'échelle nanométrique », Ph.D. thesis, PSL Research University, 2016.
- [13] M. F. Pucci, P.-J. Liotier, S. Drapier « Tensiometric method to reliably assess wetting properties of single fibers with resins : Validation on cellulosic reinforcements for composites », *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects* Vol. 512, pp. 26–33, 2017.
- [14] D. Seveno, A. Vaillant, R. Rioboo, H. Adao, J. Conti, J. De Coninck « Dynamics of wetting revisited », *Langmuir* Vol. 25 n° 22, pp. 13034–13044, 2009.