



HAL
open science

Simulation d'écoulements capillaires améliorant la maîtrise d'un procédé de fabrication de matériaux composites à matrice céramique.

Audrey Pons, Eric Arquis, Marc Valat, Cédric Le Bot, Cédric Descamps

► To cite this version:

Audrey Pons, Eric Arquis, Marc Valat, Cédric Le Bot, Cédric Descamps. Simulation d'écoulements capillaires améliorant la maîtrise d'un procédé de fabrication de matériaux composites à matrice céramique.. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621632

HAL Id: hal-01621632

<https://hal.science/hal-01621632>

Submitted on 23 Oct 2017

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.

Simulation d'écoulements capillaires améliorant la maîtrise d'un procédé de fabrication de matériaux composites à matrice céramique.

Simulation of capillary flows to improve manufacturing process of Ceramic Matrix Composites.

A. Pons^{1,2}, E. Arquis², M. Valat², C. Le Bot² et C. Descamps¹

1 : SAFRAN Ceramics
Rue de Touban - Les Cinq Chemins
33185 LE HAILLAN

2 : Institut de Mécanique et d'Ingénierie
CNRS UMR 5295
16 avenue Pey Berland 33607 PESSAC Cedex
e-mail : audrey.pons@u-bordeaux.fr

Résumé

A l'heure actuelle, l'industrie aéronautique s'implique activement dans le développement de matériaux composites à matrice céramique. Dans un avenir proche, l'objectif est d'intégrer ces matériaux innovants dans les parties chaudes des turboréacteurs. Un procédé par voie liquide appelé «Reactive Melt Infiltration» est industriellement envisagé pour fabriquer ces matériaux. La densification est tributaire de la compétition entre la montée capillaire et la réaction chimique entre le silicium liquide et la poudre préalablement introduite. Cette concurrence peut conduire à des phénomènes de «choking off» qui doivent être évités. L'écoulement capillaire peut être analysé et simulé à différentes échelles. Dans ce travail, deux échelles sont abordées : l'échelle d'une pièce dite macroscopique et l'échelle microscopique qui correspond à la taille d'un pore entre deux grains. L'aspect réactif est uniquement traité à l'échelle macroscopique par deux approches très simplifiées. La simulation de l'imbibition réactive d'une plaque rectangulaire a été effectuée avec un outil développé au sein de SAFRAN. En parallèle, la simulation d'une montée capillaire d'un fluide modèle dans un canal sinusoïdal microscopique a été effectuée avec le code de calcul Thétis (développé à l'I2M, Bordeaux). La cinétique d'imprégnation au sein de ce type de canal a été analysée et comparée à différents modèles analytiques.

Abstract

The aeronautical industry is actively involved in the development of ceramic matrix composites, the objective is to integrate them in internal hot parts of aircraft engines. A fluid processing called Reactive Melt Infiltration may be used to manufacture these components. The densification step is managed by the competition between capillary rise and the reaction between molten silicon and introduced carbon powder. It may lead to "choking off" effect that should be avoided. Capillary rise may be studied and simulated at different scales. In this work, macroscopic and microscopic scale were examined. Reactive aspect is only discussed at macroscopic scale. Simulations of capillary flows in microscopic sinusoidal channel with CFD code Thétis (developed at I2M, Bordeaux) were analysed and compared with analytical predictions.

Mots Clés : Composite à Matrice Céramique, «Reactive Melt Infiltration», simulation, montée capillaire

Keywords : Ceramic Matrix Composites, Reactive Melt Infiltration, simulation, capillary rise

1. Introduction

Les matériaux composites à matrice céramique se distinguent par leurs propriétés mécaniques spécifiques plus intéressantes que celles des matériaux métalliques traditionnels et par leur caractère hautement réfractaire. L'objectif est d'intégrer ces matériaux au cœur des turboréacteurs dans des zones fortement chargées thermiquement et mécaniquement. Ces matériaux permettent d'envisager à la fois une optimisation des cycles thermodynamiques et une élévation de la température de fonctionnement au sein des turboréacteurs, améliorant ainsi leur rendement, tout en diminuant le bruit perçu et les émissions polluantes de NO_x et de CO₂.

La voie usuellement utilisée pour créer la matrice de carbure de silicium est la densification par voie gazeuse dite CVI (Chemical Vapor Infiltration)₁. Mais, ce procédé peut conduire à une porosité

résiduelle importante qui risque d'engendrer des performances éloignées de celles attendues. Une alternative envisagée est une densification par voie liquide par infiltration capillaire réactive d'un métal fondu, « Reactive Melt Infiltration ». Ce procédé au temps de mise en œuvre court est intéressant car il permet d'envisager une très faible porosité résiduelle. L'imbibition du métal fondu consiste à combler la micro-porosité entre des grains préalablement introduits dans la préforme via un procédé APS (Aspiration de Poudre Submicronique). L'enjeu est alors de contrôler l'écoulement du métal fondu au sein de la préforme tissée. La compétition entre la montée capillaire du métal fondu et la réaction chimique peut engendrer des colmatages précoces de la matrice ou « choking off ». Ces phénomènes nuisent à la densification du matériau et le rendent non conforme. Il est donc indispensable de maîtriser et d'optimiser le procédé d'élaboration afin de garantir la conformité des matériaux fabriqués.

Cette étape d'imbibition réactive peut aussi bien être étudiée à l'échelle de la pièce, qu'à l'échelle d'un VER de l'armure, qu'à l'échelle des pores présents entre les grains. Afin de rendre le procédé robuste, le développement d'un modèle décrivant les processus de montée capillaire d'un fluide réactif au sein d'un substrat poreux a été engagé. La particularité de l'approche envisagée demeure dans l'association d'une description macroscopique du procédé d'imbibition avec une description fine des processus à l'échelle microscopique. Le couplage entre ces phénomènes physiques est très complexe et leur modélisation respective peut s'avérer délicate.

A l'échelle macroscopique il est possible de simuler un tel procédé de densification en s'appuyant sur une loi constitutive comme les lois de Darcy, de Washburn ou de Richards, via une description homogénéisée du milieu. Différentes approches analytiques ont été développées pour corriger ces lois afin de prendre en considération la réaction entre le métal fondu et le substrat carboné [1, 2, 3] Dans ce travail, l'approche proposée par Einset [4] sera analysée et remaniée, des simulations seront effectuées avec un code développé au sein de SAFRAN. A l'échelle microscopique, l'écoulement est décrit sans homogénéisation. Avant d'envisager une simulation d'imbibition d'un milieu représentatif d'un milieu réel, de géométrie complexe et a priori 3D, il a été nécessaire de qualifier l'outil numérique Thétis (développé au sein de l'I2M) sur des configurations modèles.

2. Approche macroscopique

2.1. Modèle originel d'Einset

Le modèle d'Einset est basé sur un bilan de quantité de silicium dans chaque volume élémentaire, de porosité ε , du milieu poreux étudié. Le milieu poreux est constitué de fibres et de particules de carbone et/ou de carbure de silicium. La vitesse moyenne de traversée du volume est notée \mathbf{v} . La masse de fluide contenue dans le volume élémentaire peut être quantifiée par une grandeur appelée saturation et notée Θ . En supposant que la dimension caractéristique des particules est bien inférieure à celle du volume élémentaire, le milieu poreux est considéré comme continu. Le principe de conservation de la masse conduit à l'équation suivante :

$$\iiint_V \left(\frac{\partial(\rho\varepsilon\Theta)}{\partial t} - \nabla \cdot \rho\mathbf{v} + \rho R V_l \right) dV = 0 \quad (\text{Eq. 1})$$

Où V_l est le volume molaire du silicium. Cette expression étant valable pour un volume quelconque du milieu poreux, la fonction intégrée est nulle. Le fluide est advecté avec une vitesse capillaire donnée par une pseudo loi de Darcy :

$$\mathbf{v} = \frac{k k_r}{\mu} (\nabla p_c - \rho \mathbf{g}) \quad (\text{Eq. 2})$$

où p_c est la pression capillaire, k_r la perméabilité relative et k la perméabilité géométrique. La perméabilité relative est donnée par la loi empirique de Kaviany [4] et la perméabilité géométrique est calculée avec le modèle de Dullien [5]. La pression capillaire est considérée comme proportionnelle

à la saturation et à la tension de surface. Afin d'explicitier le terme source introduisant les effets liés à la réaction chimique entre le silicium fondu et le carbone le mécanisme détaillé de réaction doit être appréhendé, or celui-ci est très complexe. Einset [4], considère comme première approche qu'une fine barrière d'épaisseur δ_0 de SiC se forme instantanément entre le silicium liquide et le carbone solide. Le taux de réaction est fonction à la fois de la quantité de carbone disponible et de celle de silicium, il s'écrit :

$$R = \frac{A_v \delta_0}{V_{SiC}} \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (\text{Eq. 3})$$

où A_v est la surface de carbone disponible par unité de volume, et V_{SiC} est le volume molaire du carbure de silicium. Dans ce modèle, la vitesse de réaction est intimement liée à la vitesse du front, cette réactivité binaire ne prévoit pas les effets de « choking off ». En négligeant la gravité, l'équation bilan s'écrit :

$$\frac{\partial(\varepsilon\Theta)}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{k k_r}{\mu} \frac{\partial p_c}{\partial \Theta} \nabla \Theta \right) - \rho R V_l \quad (\text{Eq. 4})$$

Le modèle est complété par une équation de conservation de l'énergie et une équation sur la porosité. La construction de la globalité du modèle est détaillée dans une publication d'Einset [4]. Ce modèle est particulièrement sensible aux paramètres géométriques utilisés dans le modèle de Dullien [5] et à l'épaisseur δ_0 de SiC formée lorsque le silicium et le carbone sont en contact. Le modèle a été implémenté par une approche volumes finis au sein de SAFRAN.

L'outil numérique permet la prise en compte d'une géométrie complexe et gère le contact entre différents matériaux. Il permet ainsi la modélisation complète de la densification d'une pièce et du système d'apport en métal fondu. Dans un premier temps, la géométrie étudiée est une plaque rectangulaire, de largeur 5 cm, de hauteur 10 cm et d'épaisseur 5 mm, comprenant un mélange de poudre de carbone et de carbure de silicium. Les paramètres du modèle sont tirés d'études expérimentales, hormis le paramètre δ_0 pour lequel on ne dispose pas de données. La figure 1 présente la courbe de position du front en fonction du temps pour différentes valeurs du paramètre δ_0 .

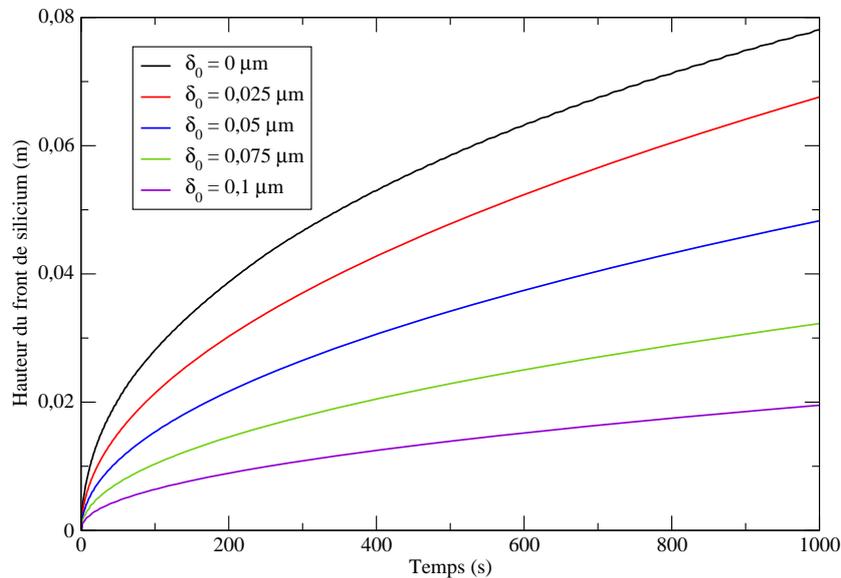


Fig. 1.: Évolution de la hauteur du front de silicium en fonction du temps pour différents δ_0

Pour une montée capillaire non réactive (i.e. $\delta_0 = 0 \text{ m}$), on observe un profil en racine carrée du temps typique d'une loi de Washburn [6]. On constate que lorsque δ_0 augmente la vitesse d'avancée du front diminue, sans jamais s'annuler. La figure 2 présente les profils de saturation, de porosité et de température, pour $\delta_0 = 0,025 \mu\text{m}$, à $t = 300 \text{ s}$.

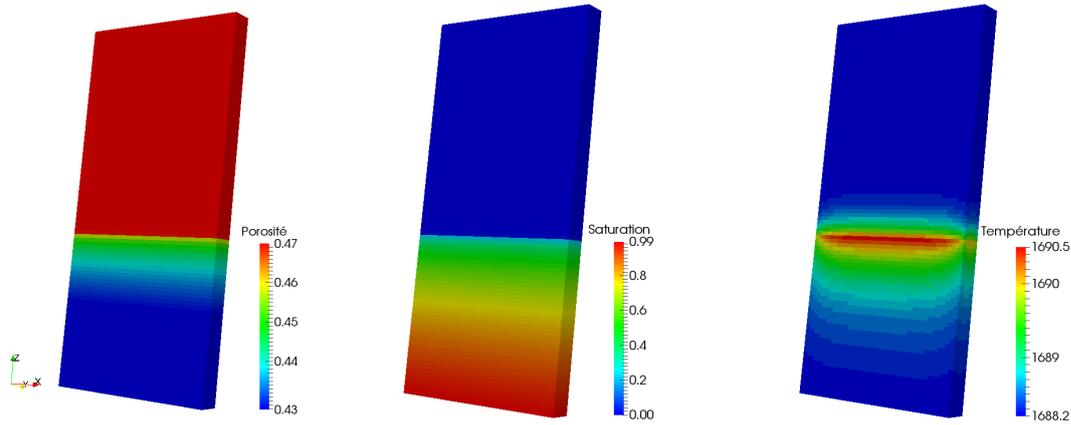


Fig. 2.: Infiltration de silicium au sein d'une plaque

Le silicium s'infiltré dans la plaque, dès qu'il est en contact avec du carbone du carbure de silicium se forme, ce qui a pour effet de diminuer la porosité du milieu. L'exothermicité due à la réaction est concentrée au niveau du front de saturation. La localisation de cette exothermicité s'explique par le modèle réactionnel de formation instantanée de carbure de silicium choisi. C'est précisément ce modèle réactionnel qui a été remanié dans la suite de ce travail.

2.2. Cinétique de réaction d'ordre 1

Dans le modèle initial la vitesse de réaction est couplée à la vitesse d'avancement du front de saturation. Il a été choisi de découpler ces deux vitesses et d'imposer un contrôle cinétique de la réaction chimique. La structure du coefficient de vitesse de production molaire R est modifiée, il s'écrit dorénavant :

$$R = k_{rc} \frac{A_v}{V_{SiC}} \Theta \varepsilon \quad (\text{Eq. 5})$$

avec k_{rc} la constante de réaction en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et A_v qui devient une fonction du temps et de la saturation. En supposant que la réaction est homogène dans un volume de référence, que les charges sont sphériques, que leur distribution est monodisperse et qu'elles sont réparties suivant une structure cubique simple, les variations locales du rayon des charges, des fractions volumiques de carbone et de carbure de silicium ainsi que la variation de porosité sont calculées. Ces variations sont utilisées pour actualiser certaines variables du modèles comme la surface totale de carbone par unité de volume disponible et la perméabilité.

La géométrie étudiée est identique au cas précédent et les paramètres communs aux deux modèles sont inchangés. La grandeur étudiée dans cette partie est la constante de réaction chimique k_{rc} . La figure 3 présente les courbes d'avancée du front au sein de la plaque pour différentes valeurs de la constante k_{rc} . Pour une constante de vitesse nulle, la cinétique d'imprégnation obtenue est bien identique à celle de référence obtenue pour δ_0 dans le précédent modèle. Un ralentissement de la montée capillaire est observé dès lors que la réactivité considérée devient importante. La différence d'aspect des courbes entre les figures 1 et 4 est l'apparition d'un maximum pour les constantes de réaction importantes. Le traitement numérique des conditions aux limites explique l'évolution du champ de saturation après ce maximum. Dans les faits, ce maximum correspond à la fermeture prématurée de la porosité dans la zone proche de l'alimentation en silicium liquide. La porosité étant complètement bouchée par le carbure de silicium produit, comme la surface d'alimentation en silicium liquide est unique le front ne peut plus progresser au sein de la plaque, la densification n'est pas totale. La figure 4 présente les profils de saturation, de porosité et de température, pour $k_{rc} = 5 \times 10^{-10} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $t = 300 \text{s}$.

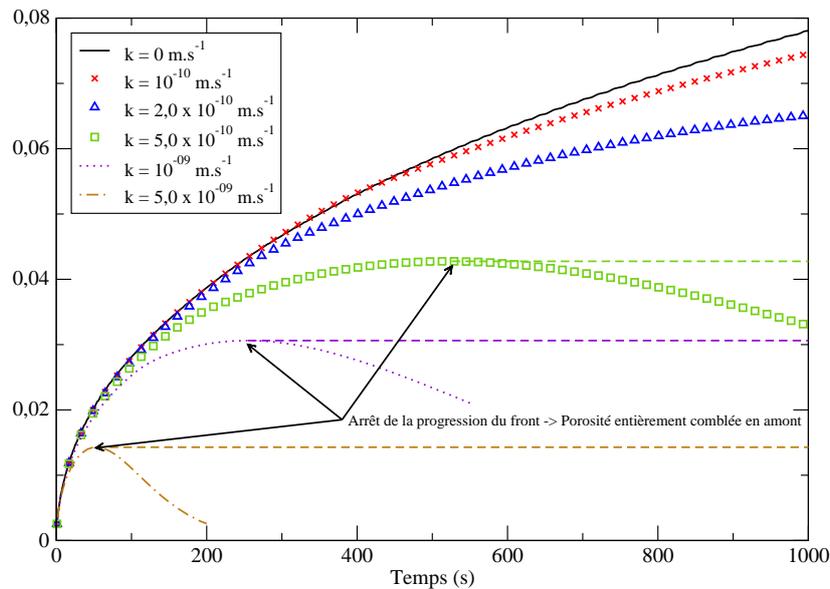


Fig. 3.: Evolution de la hauteur du front de silicium en fonction du temps

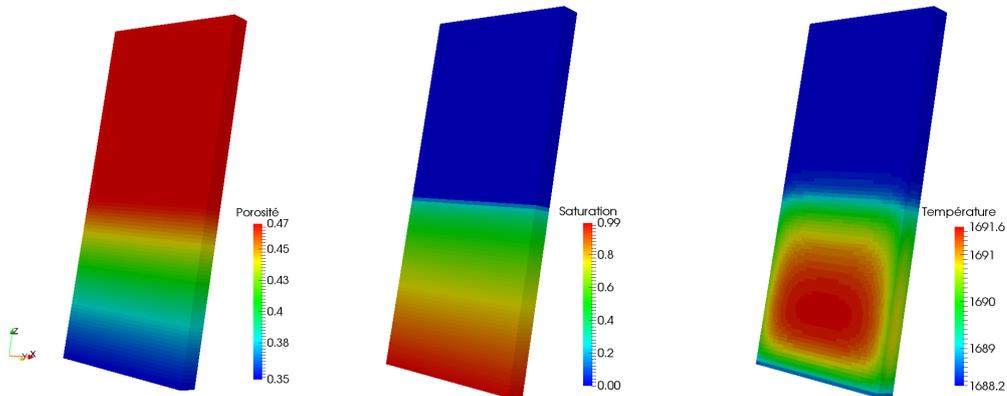


Fig. 4.: Infiltration de silicium au sein d'une plaque, $k_{rc} = 5 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $t = 300 \text{ s}$

L'allure des profils de porosité et de température a évolué, le gradient de porosité est plus étendu dans la plaque puisque les espèces continuent de réagir une fois le front de silicium passé. La différence d'aspect la plus importante est présente sur le profil de température. L'exothermie n'est plus strictement localisée sur le front de silicium mais elle est présente au cœur même de la plaque et sur les bords de celle-ci, là où le front est déjà passé. Ceci illustre le fait que la réaction est découplée de l'avancée du front de silicium. La réaction se poursuivant une fois le front passé, la porosité continue de diminuer jusqu'à zéro sur les surfaces d'alimentation en silicium liquide. L'objectif du travail est d'améliorer la description des phénomènes physiques mis en jeu et la modélisation de ces derniers afin de prévoir les fermetures prématurées de la porosité et ainsi optimiser le procédé de fabrication des pièces.

Les modèles présentés dans cette section ne sont pas prédictifs à l'heure actuelle, ils nécessitent d'être recalés et alimentés avec des données expérimentales d'une part et numériques d'autre part. Les données numériques peuvent notamment provenir d'une étude approfondie des phénomènes se déroulant aux échelles inférieures. Dans la section suivante, une première analyse d'écoulement capillaire à l'échelle du pore est proposée. Certains auteurs [7, 8] reprennent et modifient également l'approche proposée par Einset, les discussions portent notamment sur la représentativité du modèle réactionnel et de la fonction pression capillaire, ces approches ne permettent pas pour le moment de mettre en exergue les phénomènes de «choking off».

3. Écoulement capillaire au sein d'un canal sinusoïdal

La modélisation d'écoulements capillaires à l'échelle du pore nécessite l'utilisation de méthodes numériques complexes afin d'assurer le suivi de l'interface fluide/air et le mouvement d'une ligne triple.

3.1. Modèle analytique

Dans son étude Patro [9], décrit la cinétique d'imbibition d'un milieu poreux réel par un modèle géométriquement basé sur un canal sinusoïdal. Son analyse est développée pour un écoulement unidirectionnel, incompressible et laminaire. Ici, une configuration semblable bi-dimensionnelle sera analysée (figure 5).

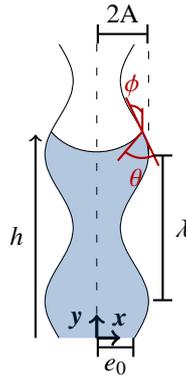


Fig. 5.: Géométrie canal sinusoïdal

La demi-largeur du canal est donnée par l'expression de $e(y)$:

$$e(y) = e_0 + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}y\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

où e_0 est la demi-largeur moyenne, A l'amplitude et λ la longueur d'onde. S'il on considère un milieu poreux réel, l'écoulement va rencontrer de nombreuses variations de section et par conséquent va subir de d'importantes variations de vitesse. Dans le modèle de Patro [9] ces variations sont considérées comme instantanées, ce qui est probablement peu représentatif. Dans ce travail, il a été choisi de reprendre la construction du modèle en conservant le terme instationnaire de l'équation de Stokes. Le débit Q traversant une section droite (par unité de largeur de canal) reste constant le long du canal. L'équation de Stokes intégrée sur une section droite pour un écoulement unidirectionnel s'écrit :

$$\rho \frac{dQ}{dt} = -2e(y) \frac{\partial p}{\partial y} + 2\mu \left(\left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{e(y)} - \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_0 \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

La condition de symétrie impose que $\left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_0 = 0$. Le profil de vitesse considéré est un profil de Poiseuille, ce qui conduit à :

$$\frac{1}{2e(y)} \rho \frac{dQ}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{3\mu}{e^3(y)} Q \quad (\text{Eq. 8})$$

La relation (Eq. 8) est ensuite intégrée à t constant le long du canal entre $y = 0$ et $y = h$. Le saut de pression à l'interface est donné par une loi de Laplace modifiée afin de tenir compte de l'inclinaison locale de la paroi au niveau de la ligne triple. Une fois le débit remplacé par son expression, l'équation différentielle du second ordre régissant la montée capillaire au sein du canal étudié est obtenue.

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = \frac{1}{\rho \int_0^h \frac{1}{e(y)} dy} \times \left[\frac{\sigma \cos(\theta + \phi)}{e^2(y)} - 3\mu \left(\int_0^h \frac{1}{e^3(y)} dy \right) \frac{dh}{dt} \right] \quad (\text{Eq. 9})$$

L'annulation du pré-facteur du terme d'ordre 2 conduit à l'équation du modèle quasi-stationnaire comparable à l'approche développée par Patro [9]. Une solution semi-analytique de cette équation est obtenue avec un script écrit en Python.

3.2. Méthode numérique

L'approche utilisée dans le code Thétis est une approche « Volume Of Fluid » basée sur une description Eulérienne de l'écoulement. Les équations sont discrétisées sur une grille fixe de type « Mark And Cell ». Le couplage vitesse-pression est résolu par la méthode du lagrangien augmenté [10, 11]. L'équation d'advection de la fonction indicatrice de phase est résolue par la méthode eulérienne VOF-PLIC (Volume Of Fluid - Piecewise Linear Interface Calculation). Cette approche est complétée par une méthode originale afin de prendre en compte le mouvement d'une ligne triple [12]. Cette méthode consiste à introduire une fonction couleur régularisée C^S , issue de la résolution d'une équation d'Helmholtz pénalisée :

$$\frac{\partial C^S}{\partial t} - \nabla \cdot D \nabla C^S + B_S (C^S - C_\infty) = 0 \quad (\text{Eq. 10})$$

Où D est un coefficient de diffusion et B_S est le terme de pénalisation. Il est possible d'imposer de manière implicite un angle de contact au niveau de la ligne triple, si une relation explicite est trouvée entre C^S et θ l'angle de contact. Les travaux de Guillaument R. [12] et Benazzouk L. [13] ont permis d'optimiser cette fonction. L'angle de contact est alors imposé via une fonction C_∞ dite gaussienne. C'est une fonction recalée sur une loi issue d'une expérience de dépôt de goutte. La fonction régularisée issue de la résolution de l'équation (Eq. 10) est utilisée à la place de la fonction couleur de base pour calculer le terme de tension de surface. Cette approche a été validée pour des simulations de dépôt de goutte sur surface plane et sur surface inclinée. Le bon comportement de l'outil a également été constaté pour des simulations de montées capillaires dans des canaux plans droits [14, 15].

Pour un calcul correct du terme de Brackbill dans des géométries complexes qui ne suivent pas les directions du maillage cartésien, il a été nécessaire d'ajouter un filtre numérique (Eq. 11) afin de limiter le calcul à la zone où l'interface fluide/air est présente.

$$\mathbf{F}_{TS} = \gamma \kappa \nabla C^S \Lambda \quad \text{où} \quad \Lambda = \begin{cases} 1 & \text{si } \|\nabla C^*\| > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{Eq. 11})$$

La fonction C^* est issue de la résolution de l'équation d'Helmholtz (Eq. 10), amputée du terme de pénalisation $B_S (C^S - C_\infty)$. Le terme de Brackbill ainsi calculé se limitera à la zone de diffusion numérique de l'interface réelle fluide/air.

3.3. Résultats

Dans un premier temps, le système de paramètres géométriques suivant est arbitrairement choisi : $r_0 = 4 \times 10^{-06}$ m, $A = 1 \times 10^{-06}$ m et $\lambda = 15 \times 10^{-06}$ m. On se place dans le cadre d'un fluide parfaitement mouillant pour la surface considérée (i.e : $\theta = 0^\circ$). Le fluide modèle considéré est caractérisé par les propriétés (ρ, μ, γ) de l'eau. Pour le modèle stationnaire, seule une hauteur $h_0 = \frac{\lambda}{4}$ est donnée en condition initiale, alors que pour le modèle instationnaire le couple $(h_0, v_0) = (\frac{\lambda}{4}, 0)$ est imposé. Le relevé de la hauteur de fluide pour les simulations se fait à partir du volume de fluide contenu dans le canal, en effet, cette donnée est facile d'accès d'un point de vue numérique. Le système de conditions aux limites appliqué est choisi de manière à éviter des courants parasites et des oscillations de pression dans la partie réservoir.

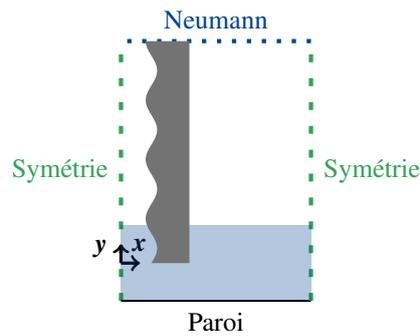


Fig. 6.: Système de conditions aux limites testés

Les profils de pression le long de l’axe de symétrie du canal pour la première configuration sont présentés pour différents instants sur la figure suivante.

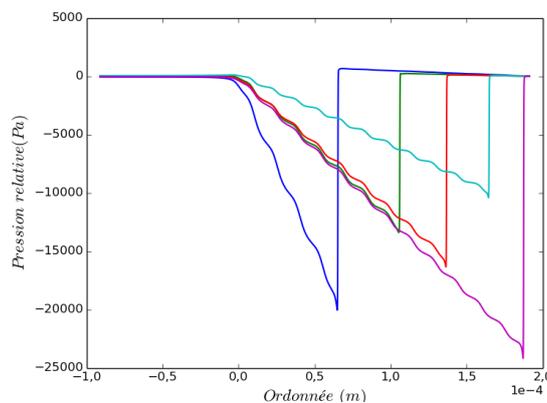


Fig. 7.: Profil de pression obtenus avec le système de conditions aux limites n°1

L’aspect qualitatif de ces profils de pression est très encourageant. Pour des ordonnées négatives la pression adopte le comportement attendu au sein d’un réservoir, elle est quasi-constante (la gravité étant négligée). On observe ensuite une décroissance caractéristique des effets visqueux, puis un saut de pression dû à la présence de l’interface fluide/air. Si ces profils de pression se révèlent également cohérents d’un point de vue quantitatif, la cinétique d’imprégnation reproduite devrait être cohérente avec les modèles précédemment introduits. Pour vérifier cela, les courbes $h = f(t)$ (cf. figure 8a) et $v = f(h)$ (cf. figure 8b) vont être analysées.

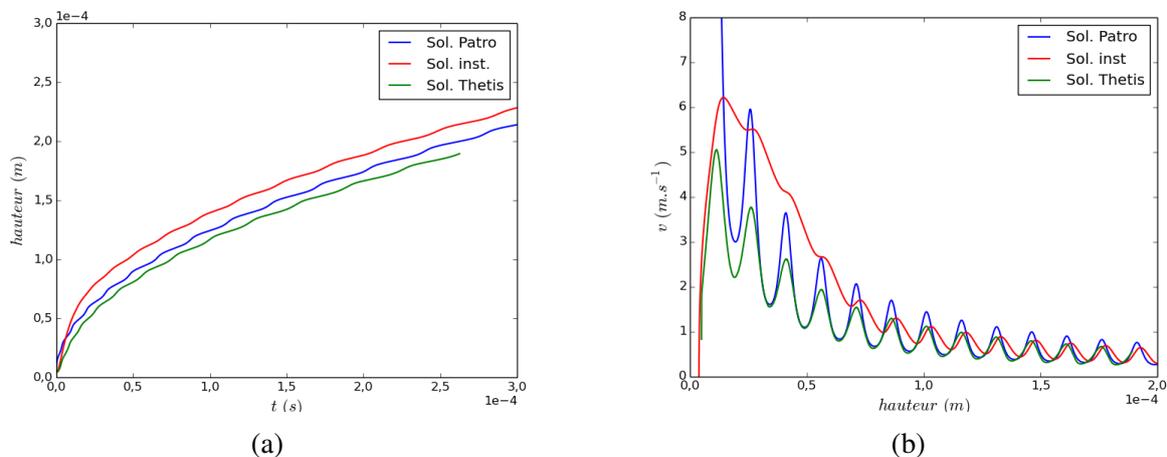


Fig. 8.: (a) Évolution de la hauteur de fluide au cours du temps. (b) Évolution de la vitesse d’infiltration en fonction de la hauteur de fluide.

Les premiers instants correspondant à la mise en place du ménisque et de l'écoulement, ils constituent une phase critique d'un point de vue numérique. Ils introduisent un déphasage par rapport au modèle analytique dans lequel l'écoulement de type Poiseuille est supposé établi. L'allure générale de la courbe est cohérente, pour en faciliter l'interprétation, l'analyse de l'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur de fluide a été entreprise. Sur la courbe de vitesse d'imprégnation, une fois l'écoulement établi, les variations d'amplitude issues de la simulation numérique semblent se rapprocher de celles fournies par le modèle instationnaire, un déphasage entre les deux courbes est tout de même à noter. Ce déphasage pourrait s'expliquer par une différence notable entre l'approche théorique et l'approche numérique au sujet de l'angle de contact considéré. En effet, dans les deux approches semi-analytiques développées l'angle de contact utilisé est constant et égal à l'angle de contact statique du système étudié alors qu'au cours de la simulation l'angle de contact représenté évolue comme illustré sur la figure 9.

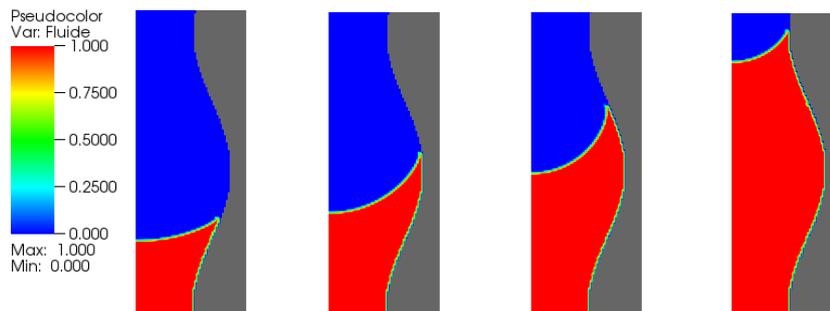


Fig. 9.: Illustrations de la forme du ménisque lorsqu'il parcourt une période du canal

Il apparaît que la courbure de l'interface et l'angle de contact précédemment définis varient au cours du parcours par le ménisque d'une période du canal. Dans le modèle théorique développé seule la variation du rayon du canal est pris en compte dans le calcul de la courbure, l'angle de contact est lui considéré comme constant, ceci pourrait expliquer quelques écarts observés.

4. Conclusion

Cette communication présente les premières analyses d'infiltrations capillaires réactives à l'échelle macroscopique et d'infiltrations capillaires non réactives à l'échelle microscopique. Cette étape de mise en place et de validation des modèles physiques et numériques, est indispensable avant d'envisager des situations plus réalistes.

A l'échelle macroscopique les modèles ne sont pas prédictifs puisqu'ils nécessitent d'être recalés et alimentés notamment avec des données expérimentales. Le mécanisme réactionnel réel de la réaction chimique étant très complexe, il est difficile de construire un modèle assurant une bonne représentativité. Mais ces premières approches permettent de mieux appréhender le couplage qu'il peut exister entre les différents phénomènes. La forme simplifiée de la courbe de pression capillaire utilisée par Einset pourrait également être modifiée au profit d'une loi plus représentative comme il en existe dans la littérature, il faudra alors vérifier sa conformité dans le cas d'un couplage avec une réaction chimique. L'écriture et l'approfondissement de ces modèles sont d'un intérêt majeur dans le but de maîtriser ce procédé de fabrication complexe.

A l'échelle microscopique, l'imprégnation capillaire d'un canal sinusoïdal s'est révélée convaincante même si quelques interrogations subsistent au sujet du traitement de l'angle de contact dynamique et sa représentativité notamment dans les zones où la section du canal varie ce qui entraîne des variations de vitesse plus ou moins importantes. Qualitativement, les variations d'angle de contact semblent cohérentes avec les nombreuses lois existant dans la littérature, l'analyse quantitative de l'évolution de l'angle de contact dynamique en fonction du nombre capillaire au sein du canal sinusoïdal est une des perspectives de ce travail.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier SAFRAN Ceramics et l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie pour leur participation au financement de ce projet.

Références

- [1] D. Muscat, R. A. Drew « Modeling the infiltration kinetics of molten aluminum into porous titanium carbide », *Metallurgical and Materials Transactions A* Vol. 25 n° 11, pp. 2357–2370, 1994.
- [2] P. Sangsuwan, S. N. Tewari, J. E. Gatica, M. Singh, R. Dickerson « Reactive infiltration of silicon melt through microporous amorphous carbon preforms », *Metallurgical and Materials Transactions B* Vol. 30 n° 5, pp. 933–944, 1999.
- [3] E. S. Nelson, P. Colella « Parametric study of reactive melt infiltration », *NASA TM-2000-209802* .
- [4] E. O. Einset « Analysis of reactive melt infiltration : I. Derivation of the governing equations », *Technical Information Series : GE Research & Development Series* Vol. 96CRD028-96CRD029.
- [5] F. A. L. Dullien, M. S. El-Sayed, V. K. Batra « Rate of capillary rise in porous media with nonuniform pores », *Journal of Colloid and Interface Science* Vol. 60 n° 3, pp. 497–506, 1977.
- [6] E. W. Washburn « The dynamics of capillary flow », *Physical review* Vol. 17 n° 3, pp. 273, 1921.
- [7] S. P. Yushanov, J. S. Crompton, K. C. Koppenhoefer, others « Simulation of manufacturing process of ceramic matrix composites », in : Excerpt Proc. COMSOL Conf, , pp. 1–6, 2008.
- [8] M. Grujicic, R. Galgalikar, S. Ramaswami, J. Snipes, R. Yavari, R. K. Bordia « Multi-physics modeling and simulations of reactive melt infiltration process used in fabrication of ceramic-matrix composites (CMCs) », *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* Vol. 11 n° 1, pp. 43–74, 2015, ISSN 1573-6105.
- [9] D. Patro, S. Bhattacharyya, V. Jayaram « Flow Kinetics in Porous Ceramics : Understanding with Non-Uniform Capillary Models », *Journal of the American Ceramic Society* Vol. 90 n° 10, pp. 3040–3046, 2007, ISSN 0002-7820, 1551-2916.
- [10] S. Vincent, J.-P. Caltagirone, P. Lubin, T. N. Randrianarivelo « An adaptive augmented Lagrangian method for three-dimensional multimaterial flows », *Computers & Fluids* Vol. 33 n° 10, pp. 1273–1289, 2004, ISSN 0045-7930.
- [11] S. Vincent, A. Sarthou, J.-P. Caltagirone, F. Sonilhac, P. Février, C. Mignot, G. Pianet « Augmented Lagrangian and penalty methods for the simulation of two-phase flows interacting with moving solids. Application to hydroplaning flows interacting with real tire tread patterns », *Journal of Computational Physics* Vol. 230 n° 4, pp. 956–983, 2011, ISSN 0021-9991.
- [12] R. Guillaument, S. Vincent, J.-P. Caltagirone « An original algorithm for VOF based method to handle wetting effect in multiphase flow simulation », *Mechanics Research Communications* Vol. 63, pp. 26–32, 2015, ISSN 00936413.
- [13] L. Benazzouk, Approche du comportement dynamique d'un oxyde liquide dans un matériau composite autocicatrisant « MAC », Bordeaux 1, 2013.
- [14] A. Pons, C. Descamps, E. Arquis, S. Vincent, C. Le Bot, M. Valat « Simulation of reactive melt infiltration for the manufacture of ceramic matrix composites », Begel House Inc., 2015.
- [15] E. Arquis, A. Pons, K. Dugois, C. Le Bot, M. Valat, S. Vincent, C. Descamps « Ecoulements capillaires et chargés dans les procédés d'élaboration de composites par APS et RMI », 2015.