

La modélisation tridimensionnelle et la simulation numérique avec REM3D[®]

Sommaire

5.1	Le logiciel REM3D[®]	75
5.1.1	Introduction	75
5.1.2	Intérêt de l'utilisation de REM3D [®]	78
5.1.3	Résolution du problème de Stokes pour des fluides incompressibles	79
5.1.3.1	Formulation variationnelle du problème de Stokes	79
5.1.3.2	Formulation dans le domaine vide	79
5.2	L'adaptation de maillage	80
5.2.1	La méthode	81
5.2.2	Application à notre étude	83
5.3	Simulation d'instabilités	83
5.4	Simulation directe de l'étirage	85
5.5	Conclusion des simulations	97

5.1 Le logiciel REM3D[®]

5.1.1 Introduction

LE logiciel REM3D[®] développé au CEMEF par [PICHELIN, 1998], [DABOUSSY, 2000], [BIGOT, 2001], [BATKAM, 2002], [ROCHA DA SILVA, 2004] pour la simu-

lation de l'injection de thermoplastiques est l'outil que nous allons utiliser afin de simuler notre procédé.

Ce logiciel est constitué de trois principaux solveurs qui forment sa base numérique : un solveur mécanique de Stokes, un solveur de transport et un solveur thermique.

◇ Le solveur de Stokes

Destiné à la résolution du problème mécanique de Stokes en vitesse et pression, il est basé sur une méthode éléments finis mixtes utilisant l'élément stable $P1 + /P1$ ([COUPEZ, 1996]). La résolution se fait par une méthode itérative de type résidu conjugué préconditionné.

Dans le cadre de la version multidomaine du logiciel, différents solveurs ont vu le jour, chacun étant associé à un domaine pris en compte dans une simulation. Ainsi, le code possède à ce jour :

- ✓ un solveur fluide viscoplastique dans lequel sont résolues les équations de Stokes pour les domaines fluides ;
- ✓ un solveur gaz : le gaz est représenté par un fluide compressible de faible viscosité ;
- ✓ un solveur outil permettant de traiter certains aspects du couplage fluide / structure. Ces outils peuvent être rigides, faiblement compressibles ou élastiques.

Le fluide est considéré comme un fluide newtonien incompressible. Les inconnues du problème sont la vitesse et la pression notées respectivement $\mathbf{v}$ et p . Les tenseurs des vitesses de déformation et des contraintes sont définis par :

$$\epsilon = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^t) \quad (5.1)$$

$$\sigma = 2\eta(|\epsilon(\mathbf{v})|)\epsilon(\mathbf{v}) - p\mathbb{1}$$

La viscosité dépend du taux de cisaillement $\dot{\gamma} = \sqrt{2 \sum_{i,j} \dot{\epsilon}_{i,j}^2}$ suivant une loi qui peut être de la forme :

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0((c + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{(m-1)/2}) \quad (5.2)$$

Un comportement newtonien correspond à $m = 1$, une loi puissance est obtenue en prenant $c = 0$ et $c = 1$ donne une loi de Carreau.

Finalement, pour des fluides incompressibles, les équations du problème sont, dans le sous-domaine Ω_f :

$$\begin{cases} 2\nabla \cdot (\eta(|\epsilon(\mathbf{v})|)\epsilon(\mathbf{v}) - \nabla p = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

◇ Le solveur équation de transport

Il permet de déterminer l'avancée du front de matière. À chaque sous-domaine est associée une fonction caractéristique, S_{Ω_i} , définie par :

$$S_{\Omega_i}(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{x} \in \Omega_i(t) \\ 0 & \text{si } \mathbf{x} \notin \Omega_i(t) \end{cases} \quad \forall t \quad (5.4)$$

Elle est obtenue à chaque incrément de temps par résolution de l'équation de transport :

$$\frac{dS_{\Omega_i}}{dt} = \frac{\partial S_{\Omega_i}}{\partial t}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{v} \cdot \nabla S_{\Omega_i}(\mathbf{x}, t) \quad \forall x \in \Omega, \forall t \in \mathbb{R}^+ \quad (5.5)$$

Dans le cas de l'utilisation d'une description ALE (Arbitrary Eulerian-Lagrangian), une vitesse arbitraire $\mathbf{u}$ est associée à chaque point géométrique x . L'équation de transport doit prendre en compte ce mouvement à travers l'équation :

$$\frac{dS_{\Omega_i}}{dt} = \frac{\partial S_{\Omega_i}}{\partial t}(\mathbf{x}, t) + (\mathbf{v} - \mathbf{u}) \cdot \nabla S_{\Omega_i}(\mathbf{x}, t) \quad \forall x \in \Omega, \forall t \in \mathbb{R}^+ \quad (5.6)$$

Il apparaît dans l'équation (5.6) que si la vitesse arbitraire $\mathbf{u}$ coïncide avec la vitesse du fluide, la variation spatiale de la fonction caractéristique sera nulle : c'est une formulation lagrangienne. Au contraire, si $\mathbf{u}$ est nulle, nous serons dans le cas d'une description eulerienne. En pratique, dans le cas qui nous intéresse, nous choisirons une vitesse de maillage égale à la vitesse du fluide dans la direction de déformation, et nulle dans les deux autres directions.

◇ Le solveur thermique

Il permet de résoudre l'équation de la chaleur instationnaire, sous certaines hypothèses : fluide sans transformation physique ou chimique, masse volumique constante, capacité calorifique et énergie cinétique négligeables et pas de transfert de chaleur par rayonnement entre les fluides et le moule. L'équation prise en compte se met sous la forme :

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \rho c \mathbf{v} \cdot \nabla T = -\nabla \cdot \mathbf{q} + \underbrace{\mathcal{S}}_w : \underline{\underline{\epsilon}} \quad (5.7)$$

Le flux de chaleur est exprimé par la loi de Fourier :

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

Le couplage thermomécanique est pris en compte dans la puissance dissipée $\dot{w}$ qui dépend de la vitesse et de la viscosité. La thermodépendance de la viscosité peut être prise en compte via une loi d'Arrhénius (utilisée en injection des polymères mais différente de celle appliquée dans le cas du fibrage), en introduisant une viscosité connue à une certaine température de référence, ainsi :

$$\eta(T) = \eta_{T_{ref}} \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (5.8)$$

REM3D® est basé sur une formulation eulerienne du problème : la totalité du domaine à étudier est maillée dès le début de la simulation, et la topologie du maillage est fixe (le nombre de points et d'éléments qui composent le maillage, ainsi que les différentes connexions).

Une fois les différents sous-domaines connus, le problème mécanique peut être résolu, puis le problème thermique. L'enchaînement de ces différentes opérations est illustré dans la figure 5.1.

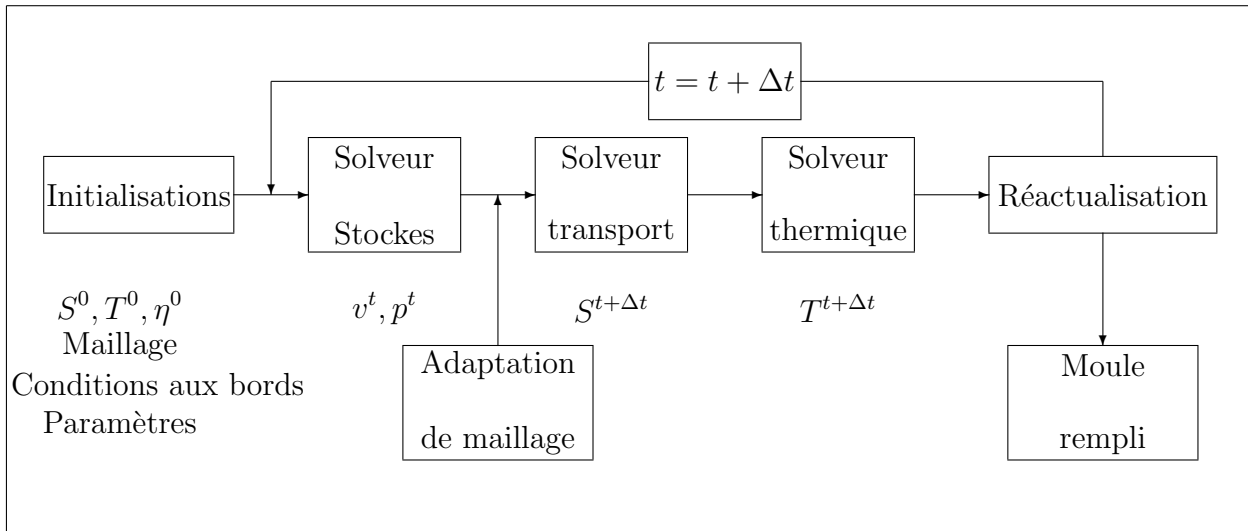


FIG. 5.1 – Fonctionnement de REM3D®

5.1.2 Intérêt de l'utilisation de REM3D®

Bien que ce logiciel ait été initialement conçu pour la simulation en injection des polymères, sa flexibilité le rend adaptable à un bon nombre d'applications : co-extrusion, écoulements avec interaction fluide-structure [BATKAM, 2002], fonderie [SAEZ, 2003], expansion de mousses [BRUCHON, 2004] ...

Dans le cas qui nous préoccupe, c'est la capacité de REM3D® à gérer les domaines multiples, les interfaces et les surfaces libres qui va nous intéresser. À cela, s'ajoute la possibilité d'adapter le maillage ce qui permet de mieux capturer les interfaces.

5.1.3 Résolution du problème de Stokes pour des fluides incompressibles

5.1.3.1 Formulation variationnelle du problème de Stokes

Comme nous l'avons vu en introduction, le code REM3D® est constitué d'un solveur de Stokes. Il permet de résoudre les équations mécaniques écrites sous la forme de Stokes généralisée dans le cas incompressible et compressible [ROCHA DA SILVA, 2001]. Pour un domaine fluide incompressible, le système de Stokes a été introduit précédemment (5.3).

Si la fonction caractéristique du fluide est connue à l'instant t , il est possible de déterminer le sous domaine Ω_f contenant le fluide. La frontière Γ de Ω est divisée en deux parties : Γ_m correspondant à la frontière avec le moule et Γ_i qui est le plan d'entrée (dans le cas de l'injection). Nous avons alors $\Gamma = \Gamma_m \cup \Gamma_i$ et nous prenons un champ de vitesse virtuel $\mathbf{w} \in H_\Gamma^1(\Omega)^3$ défini par, dans le cas newtonien :

$$H_\Gamma^1(\Omega)^3 = \{ \mathbf{w} \in H_\Gamma^1(\Omega)^3 : \mathbf{w} = \mathbf{0} \text{ sur } \Gamma_m, \mathbf{w} - (\mathbf{w} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} = \mathbf{0} \text{ sur } \Gamma_i \} \quad (5.9)$$

Ainsi, le problème à résoudre est : trouver $(\mathbf{v}, p)$ tels que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\Omega_f} 2\eta(|\epsilon(\mathbf{v})|)\epsilon(\mathbf{v}) : \epsilon(\mathbf{w}) d\Omega - \int_{\Omega_f} p \nabla \cdot \mathbf{w} d\Omega = \int_{\Omega_i} p_i \mathbf{w} \cdot \mathbf{n} d\Gamma \\ - \int_{\Omega_f} q \nabla \cdot \mathbf{v} d\Omega = 0 \end{array} \right. \quad \forall (\mathbf{w}, q) \in H_\Gamma^1(\Omega_f)^3 \times L^2(\Omega_f) \quad (5.10)$$

$$\text{Où } L^2(\Omega_f) = \left\{ v : \Omega \rightarrow \mathbb{R}; \int_{\Omega} v^2 dx < +\infty \right\}$$

Ce système 5.10 peut se généraliser sur tout le domaine en multipliant les différents termes par la fonction caractéristique des fluides.

5.1.3.2 Formulation dans le domaine vide

Le domaine vide est le domaine complémentaire du (ou des) domaine(s) fluide(s) dans la cavité. Les champs de vitesse et de pression étant définis uniquement dans le domaine

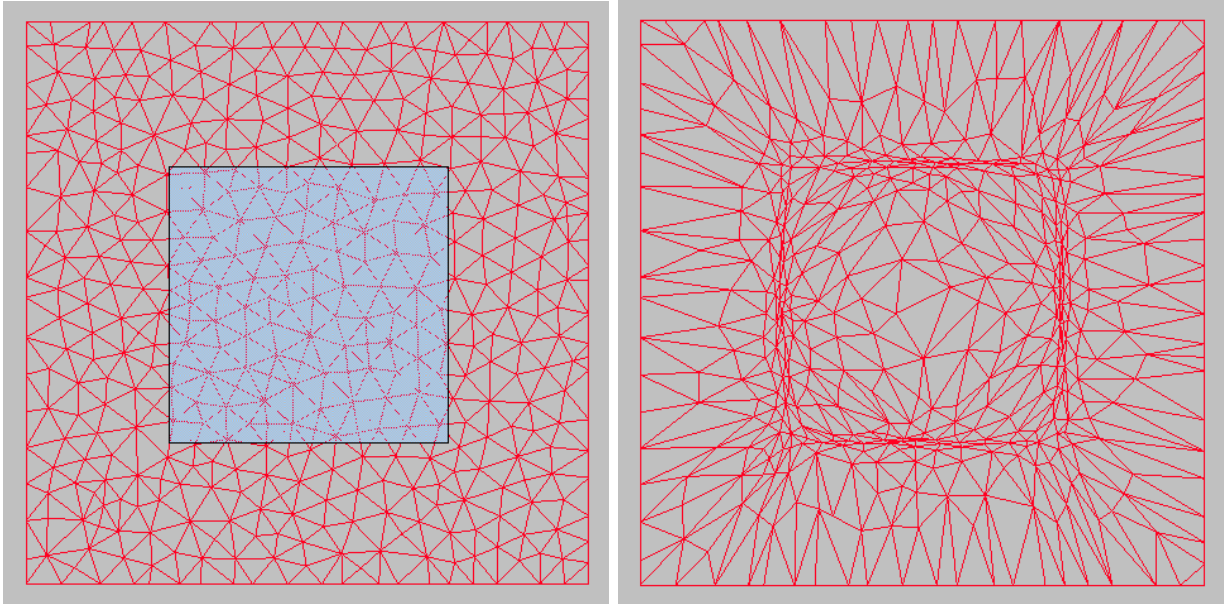
fluide, ils sont prolongés dans la partie vide de manière à ne pas perturber le fluide. La pression est nulle dans le vide mais non nulle à l'interface fluide/vide. La vitesse est continue dans le domaine de calcul, elle est donc prolongée dans le vide en posant : $div(2\eta_v \epsilon(\mathbf{v})) = 0$; η_v étant la viscosité du vide, grandeur purement numérique.

Ainsi, avec le modèle compressible introduit par [ROCHA DA SILVA, 2004] la formulation variationnelle dans le domaine vide s'écrit :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} 2\eta_v \epsilon(\mathbf{v}) : \epsilon(\mathbf{w}) d\Omega - \int_{\Omega} p \nabla \cdot \mathbf{w} d\Omega &= 0 \quad \forall \mathbf{w} \in H^1(\Omega_v)^3 \\ \int_{\Omega} q \nabla \cdot \mathbf{v} d\Omega + \chi \int_{\Omega} pq d\Omega &= 0 \quad \forall q \in L^2(\Omega_v) \end{aligned} \quad (5.11)$$

5.2 L'adaptation de maillage

Le module d'adaptation de maillage a initialement été développé dans REM3D® par E. Bigot. Dans le cas statique, le problème est le suivant et est illustré sur la figure (5.2) : nous voulons déformer le maillage initial aux frontières d'un sous-domaine (carré sur la figure 5.2(a)) afin de bien visualiser l'interface entre les deux domaines figure 5.2(b).



(a) Maillage initial

(b) Maillage adapté

FIG. 5.2 – Principe de l'adaptation de maillage

5.2.1 La méthode

Pour définir le sous-domaine Ω_f , une fonction caractéristique lui est associée et est définie sur Ω par :

$$\mathbb{1}_{\Omega_f}(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{x} \in \Omega_f \\ 0 & \text{si } \mathbf{x} \notin \Omega_f \end{cases} \quad \forall t \quad (5.12)$$

En notant $\mathbb{1}_{\Omega_f}^h = \pi^h(\mathcal{M})\mathbb{1}_{\Omega_f}$ la projection de la fonction caractéristique sur le maillage, le problème peut se mettre sous la forme [BIGOT, 2001] :

$$\min_{\mathcal{M}} \|\pi^h(\mathcal{M})\mathbb{1}_{\Omega_f} - \mathbb{1}_{\Omega_f}\| \quad (5.13)$$

La méthode d'adaptation de maillage est une méthode de type r-adaptation ce qui signifie que les éléments sont déformés mais que la topologie de maillage reste inchangée au cours de la simulation.

L'erreur exacte d'interpolation commise peut s'écrire [BIGOT, 2001] :

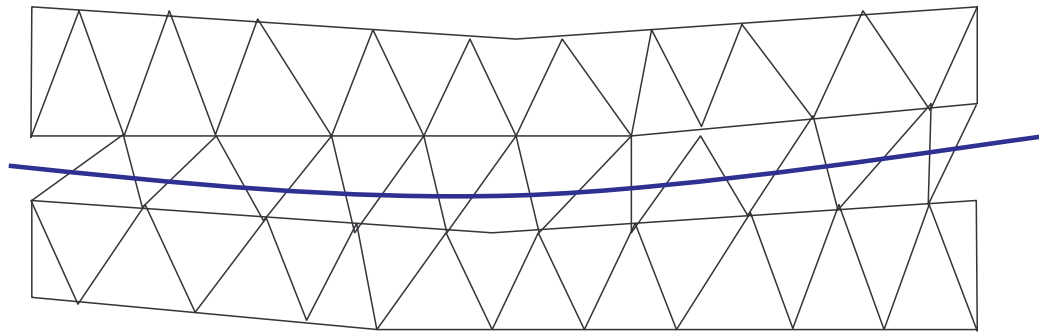
$$\epsilon = \|\mathbb{1}_{\Omega_f}^h - \mathbb{1}_{\Omega_f}\|_{0,K} = \left(\sum_{K \in \mathcal{T}_h(\Omega)} (1 - \mathbb{1}^K)\mathbb{1}^K |K| \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.14)$$

où $\mathbb{1}^K$ est la valeur de l'interpolé sur l'élément K .

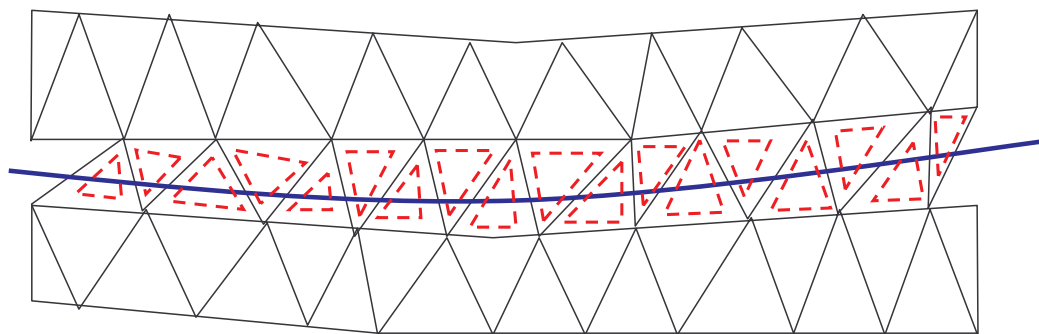
En observant l'expression 5.14, il apparaît que seuls les éléments dont la fonction caractéristique est ni 0 ni 1 contribuent à l'erreur. Ces éléments sont ceux qui sont traversés par l'interface entre les deux domaines. Leur contribution à l'erreur est proportionnelle à leur volume $|K|$ et la valeur de la fonction caractéristique. Ainsi, pour réduire l'erreur d'interpolation, il y a trois solutions :

1. réduire le nombre d'éléments traversés par l'interface ;
2. modifier la valeur de la fonction caractéristique sur ces éléments ;
3. réduire le volume de ces éléments.

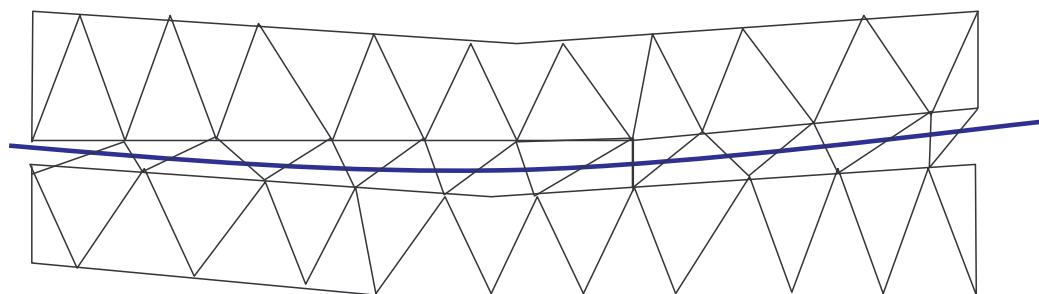
Intuitivement, l'idée la plus simple à mettre en œuvre est de réduire le volume des éléments. Comme nous n'avons à priori aucune information sur la façon de réduire ce volume, [BIGOT, 2001] a choisi de le réduire intelligemment selon une homothétie centrée par rapport au barycentre de l'élément.



(a) Maillage initial



(b) Volumes Visés



(c) Maillage final

FIG. 5.3 – Illustration de la méthode d'adaptation

Le déplacement des nœuds doit permettre d'atteindre les volumes visés pour chaque éléments. Ce déplacement est calculé par un algorithme itératif inspiré par des méthodes de régularisation de maillage par barycentrage. Cette méthode consiste à placer chaque nœud au barycentre des positions de ces voisins.

L'algorithme initialement implanté dans REM3D® [BIGOT, 2001] peut être vu comme un algorithme de barycentrage pondéré. En effet la méthode précédente est modifiée en affectant un poids à chaque nœud en vue d'attirer les nœuds dans les zones où l'erreur est la plus importante.

Nous ne rentrerons pas dans le détail du calcul des poids, ce point est détaillé dans la thèse d'Erwan Bigot [BIGOT, 2001].

5.2.2 Application à notre étude

L'adaptation de maillage va donc nous permettre de capturer les interfaces entre les différentes couches de matériaux et la surface libre.

Dans le cas qui nous intéresse, nous sommes confrontés à de forts taux d'étirage ce qui implique de fortes réductions de diamètre qui limitent directement les possibilités de calcul si l'on se contente d'une description eulerienne (la réduction de diamètre possible est alors directement liée au nombre d'éléments de maillage utilisés dans l'épaisseur, la diffusion numérique devenant trop importante). Ainsi, pour obtenir les taux de réduction souhaités, il faudrait mettre beaucoup d'éléments. Mais le temps de calcul étant croissant avec le nombre d'éléments, il est nécessaire de trouver un compromis.

La première solution à laquelle nous avons pensé est une description lagrangienne dans le sens de la réduction de diamètre. Cette solution s'est avérée inadaptée car avec de trop fortes réductions de diamètre, nous nous retrouvons avec des éléments complètement écrasés qui finissent par dégénérer. Les résultats obtenus sont présentés en annexe.

5.3 Simulation d'instabilités

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la simulation d'instabilités hydrodynamiques dans le cas instationnaire. Ce type d'instabilités est bien connu pour des procédés tels que le filage textile. Dans ce cas, et si l'étirage est isotherme, certains auteurs ([AGASSANT et others, 1996], [DEMAY et AGASSANT, 1982]) ont montré qu'il existait un taux d'étirage critique au dessus duquel le procédé était toujours instable. Ce taux d'étirage est $D_r = 20.22$ dans le cas isotherme.

Afin de mettre en évidence les possibilités du logiciel Rem3D®, notre première simulation sera une simulation d'un étirage plan avec deux matériaux dans un cas isotherme. Le but est de retrouver le résultat précédent, à savoir que si le taux d'étirage est inférieur à la valeur critique, le procédé est stable et inversement dans le cas où le taux d'étirage est supérieur.

La géométrie choisie est une géométrie plane, représentée figure 5.4, avec un maillage assez fin. La simulation est isotherme avec un taux d'étirage de 21. Notons que le module d'adaptation de maillage est utilisé. Les conditions aux limites sont donc :

- ✓ des conditions de symétrie sur les surfaces dans le plan de la figure.
- ✓ un champ de vitesse imposé dans le plan d'entrée, de la forme $[v_0; 0; 0]$
- ✓ un champ de vitesse imposé dans la direction d'étirage dans le plan de sortie (du type $[v_l; \text{libre}; \text{libre}]$), de sorte que : $\frac{v_l}{v_0} = 21$.

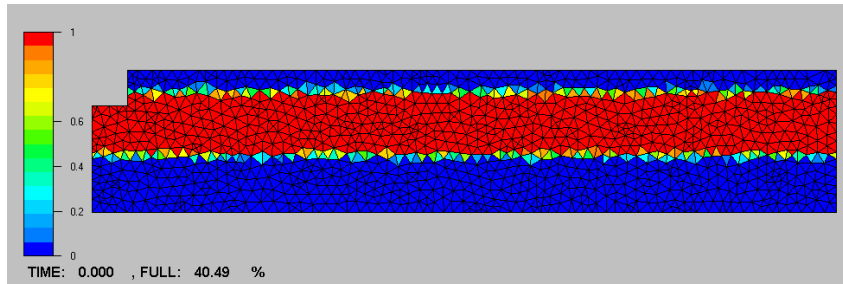


FIG. 5.4 – Géométrie initiale

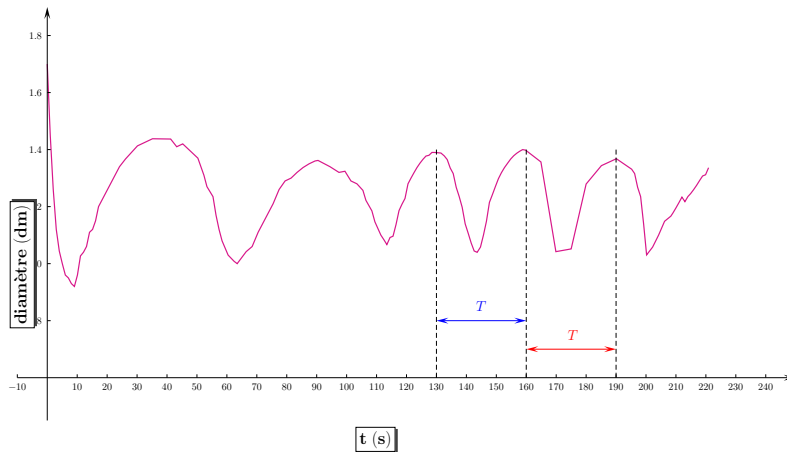


FIG. 5.5 – Évolution du diamètre en fonction du temps pour un taux d'étirage $D_r = 21$

Sur la figure 5.5 est représentée l'évolution de la coordonnée verticale d'un point de la surface libre. Apparaissent successivement, un régime transitoire, suivi d'un régime stationnaire instable, avec une instabilité de période $T = 30$ s environ. Ce résultat est intéressant : il permet de retrouver que, pour un étirage isotherme avec un taux d'élongation supérieur à $D_r = 20.22$, une instabilité hydrodynamique apparaît. De plus, il montre que la simulation numérique multi domaine est possible avec REM3D®.

De la même manière, nous avons fait la simulation avec un taux d'étirage de 19 afin de vérifier la stabilité. Là encore, nous observons le résultat attendu : il apparaît toujours un régime transitoire puis le diamètre se stabilise très vite.

Ces premières simulations nous ont permis de tester les capacités de REM3D® sur un cas d'étirage. Nous avons en même temps pu voir que le module d'adaptation de maillage était très efficace.

5.4 Simulation directe de l'étirage

Il s'agit à présent de s'intéresser à une simulation axisymétrique de l'étirage. La géométrie initiale est un huitième de cylindre pour lequel les plans de coupe sont définis comme plans de symétrie. La figure 5.6 représente cette géométrie avec le maillage utilisé.

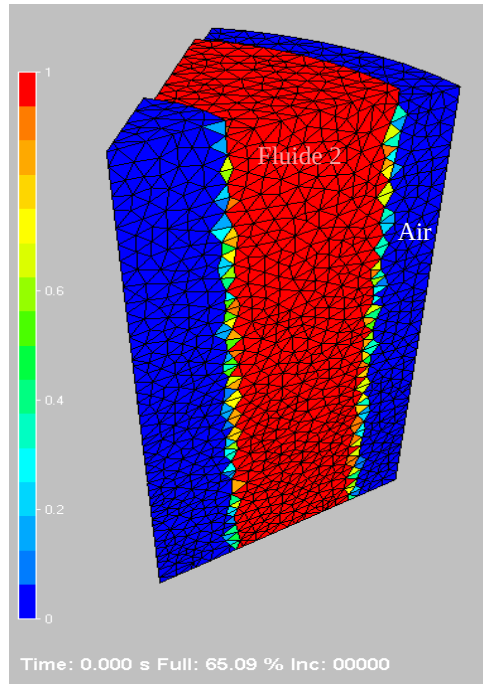


FIG. 5.6 – Géométrie utilisée pour la simulation

Les conditions aux limites sont : une vitesse imposée dans le plan supérieur du cylindre, une vitesse imposée dans le plan inférieur, conformément aux conditions réelles de fabrication.

Les transferts de chaleur restent un réel problème. Toutefois, nous connaissons parfaitement le champ de température réel le long du chemin de fibrage. Ce profil de température conditionne les variations de viscosité dans les différentes couches de matériau. Ainsi, connaissant la température, nous pouvons faire varier la viscosité à prendre en compte dans les différents domaines. Le logiciel ne résout donc pas l'équation de la chaleur, pour lui les conditions sont isothermes, mais en réalité, les variations de températures sont prises en compte via les variations de viscosité.

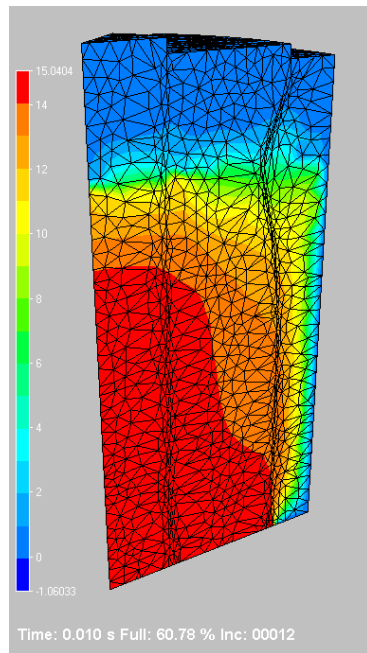
Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 5.7 et 5.8.

Tout d'abord, sur les figures 5.7(a) et 5.7(b), est représentée la composante verticale de la vitesse de chaque domaine. Cette composante de la vitesse étant imposée dans les plans d'entrée et de sortie pour les domaines fluides, nous retrouvons bien que $v_z = v_{imposee}$ dans ces deux plans.

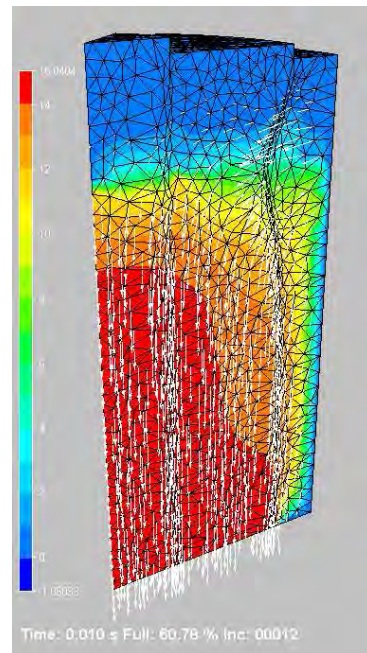
Les interfaces entre les domaines (fluide/fluide et fluide/air) sont mises en évidence par le maillage qui s'est adapté aux frontières.

Sur la figure 5.7(b), en plus du champ de vitesse selon Oz , apparaissent les vecteurs vitesse aux nœuds du maillage. Il est intéressant de noter que la composante verticale de la vitesse est prépondérante mais plus les nœuds sont éloignés de l'axe et plus la composante radiale est grande. Donc la fibre a bien tendance à s'étirer vers le bas.

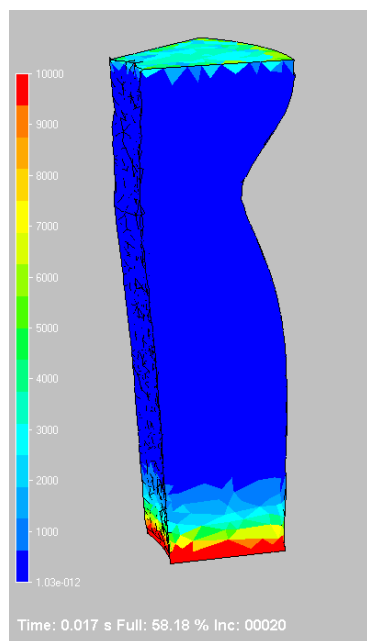
Dans les figures 5.7(c) à 5.7(h), nous avons isolé le domaine fluide central, ceci afin de bien montrer la qualité des interfaces d'une part avec l'autre fluide, d'autre part avec l'air, l'échelle de couleur représentant les variations de viscosité dans le domaine concerné. L'évolution de la forme de ce domaine au cours du temps est également mise en évidence ici. En fin de simulation, figure 5.7(h), le diamètre dans le plan de sortie a fortement diminué, sous l'action de l'effort de fibrage, la fibre s'étire pour atteindre un diamètre très petit. Ce résultat est conforme au procédé réel.



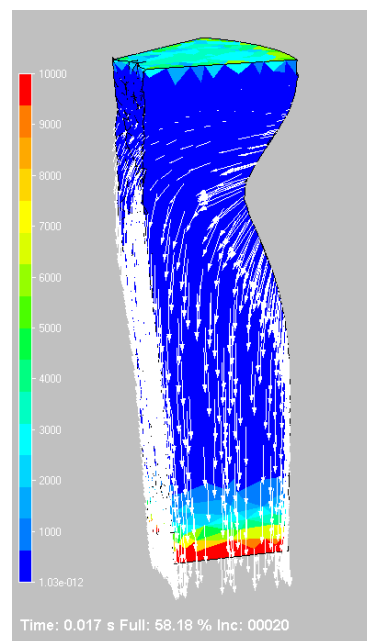
(a)



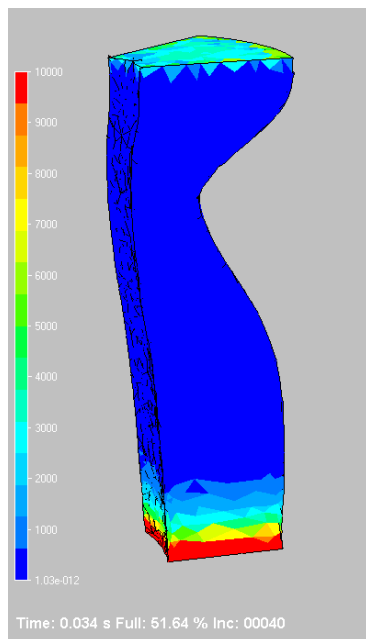
(b)



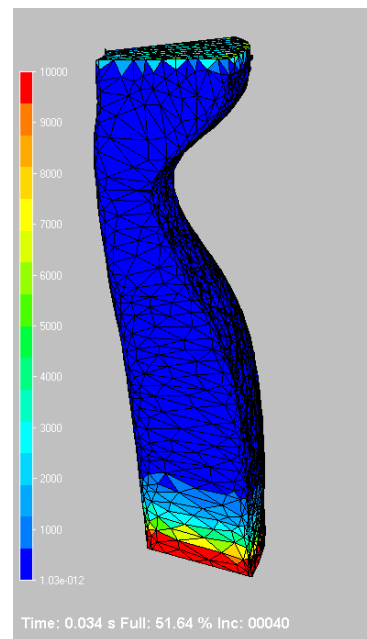
(c)



(d)



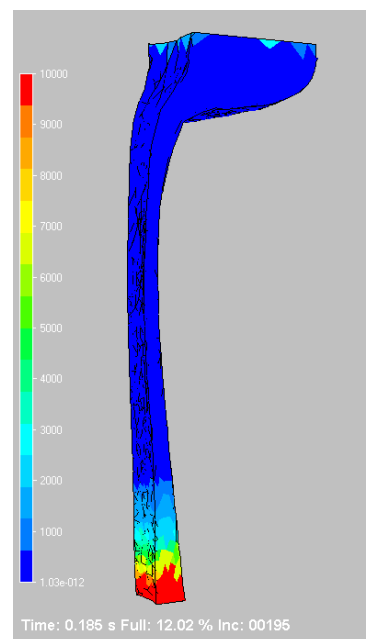
(e)



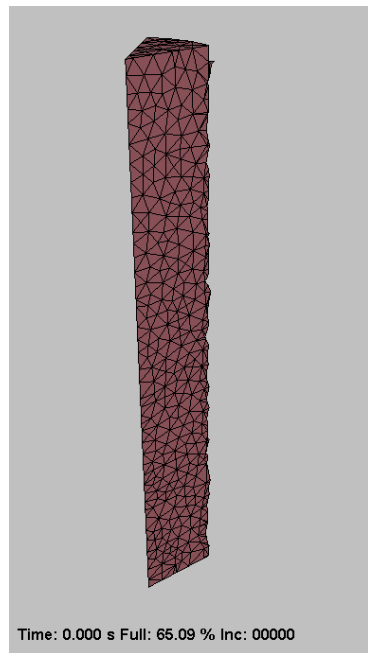
(f)



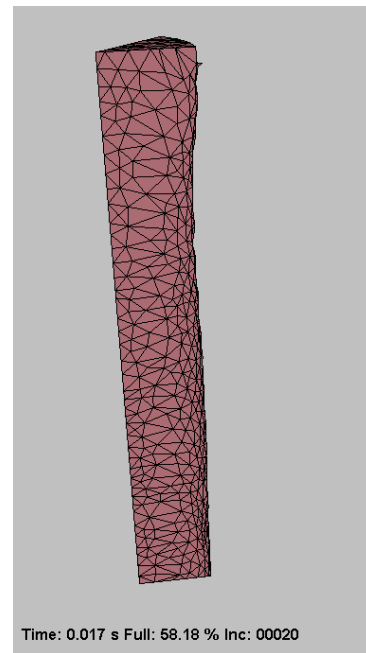
(g)



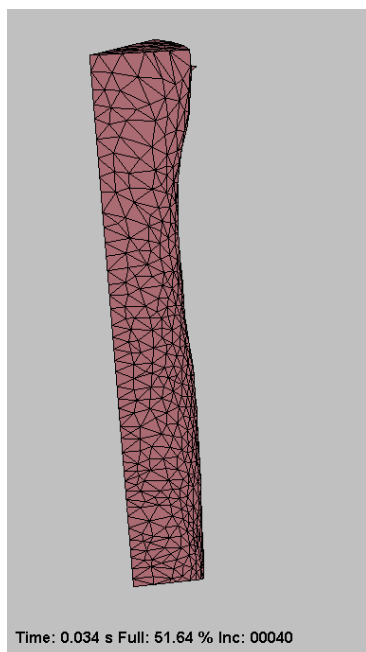
(h)



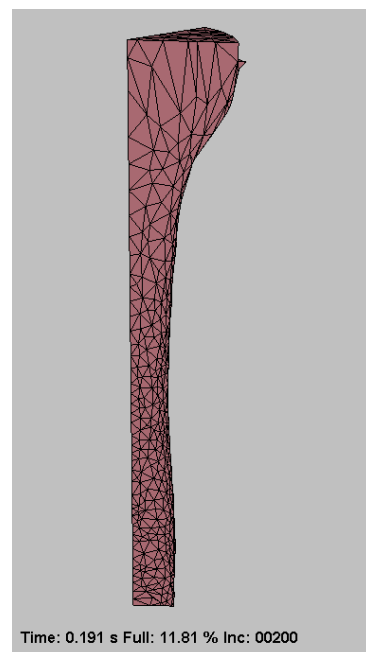
(i)



(j)



(k)



(l)

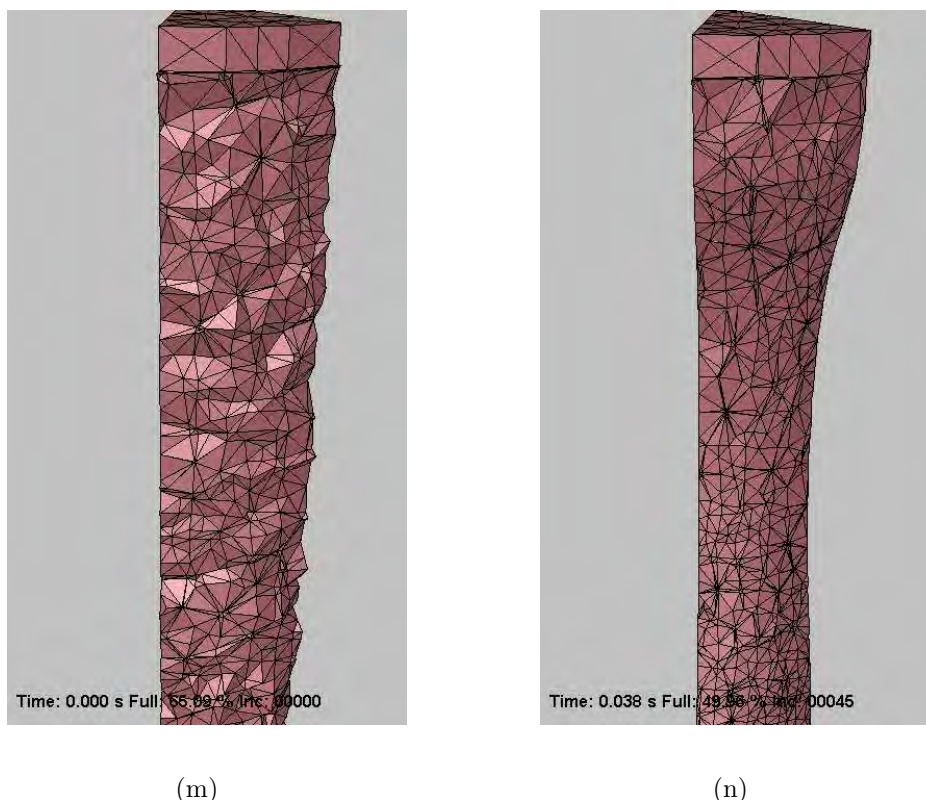


FIG. 5.7 – Résultats de la simulation avec un grand taux d'étirage

Sur les figures suivantes, 5.7(i) à 5.7(l), est isolé le cœur de la fibre. L'évolution au cours de la simulation de ce cœur est moins rapide, c'est-à-dire que le diamètre de cette partie de fibre dans le plan de sortie diminue moins vite que pour la partie intermédiaire. Cela s'explique du fait de la viscosité plus importante du cœur par rapport à l'autre couche de verre.

La qualité de l'interface entre les domaines fluide doit être suffisante en vue d'une exploitation de la simulation. Cette interface est visible sur les figures 5.7(m) pour le début de la simulation et 5.7(n) en cours de simulation. Alors qu'en début de simulation les éléments du maillage ne sont pas tous dans la surface interface, en cours de calcul, le déplacement des nœuds du maillage entraîne une meilleure définition de cette interface.

Sur la figure 5.8, nous pouvons voir au zoom au voisinage de l'interface entre la couche extérieure de verre et l'air ; la déformation du maillage autour de cette interface est très nette, les éléments du maillage se sont aplatis afin d'épouser la forme calculée de l'interface.

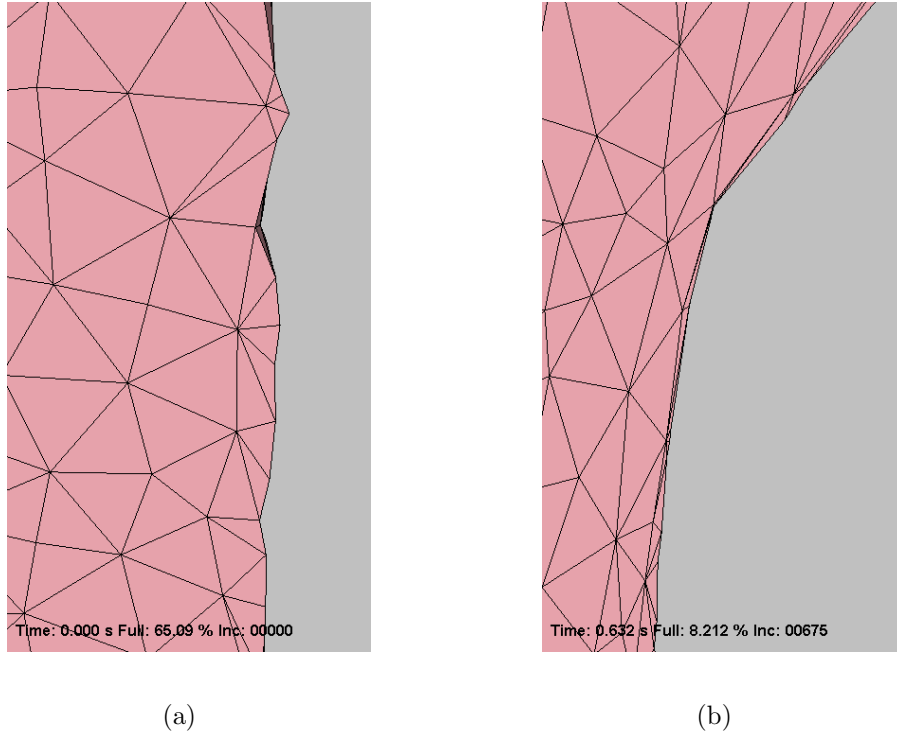


FIG. 5.8 – Zoom aux interfaces cœur-gaine et gaine-air

Le profil géométrique extérieur a une forme très proche de celle obtenue avec le modèle 1D. Pour vérifier ce résultat, nous avons comparé le profil obtenu par le modèle unidimensionnel avec celui obtenu par la simulation REM3D[®], figure 5.9. Nous pouvons en conclure que la simulation numérique permet de prévoir correctement la forme de la fibre obtenue par fibrage d'une part, et d'autre part que l'adaptation de maillage permet d'obtenir un contour plus net.

Si les résultats obtenus sont corrects, ils n'en demeurent pas moins insuffisants. En effet, nous atteignons les limites du code avec la simulation précédente : nous avons du mal à aller plus loin puisque le diamètre de la fibre en bas du chemin de fibrage est très petit devant le diamètre initial. Ainsi, le remaillage est complexe et les éléments du maillage dégénèrent avant d'atteindre le diamètre visé. Il apparaît alors intéressant de limiter le calcul dans la partie haute de l'écoulement : c'est la partie où la déformation est la plus importante et là où le modèle unidimensionnel est insuffisant.

La simulation suivante prend donc en compte les vingt premiers centimètres de fibre au cours du procédé. Les conditions aux limites en vitesse sont connues — puisque le profil géométrique est connu expérimentalement — et la simulation se fera avec deux matériaux dont les caractéristiques rhéologiques sont légèrement différentes (matériau de cœur et matériau de gaine).

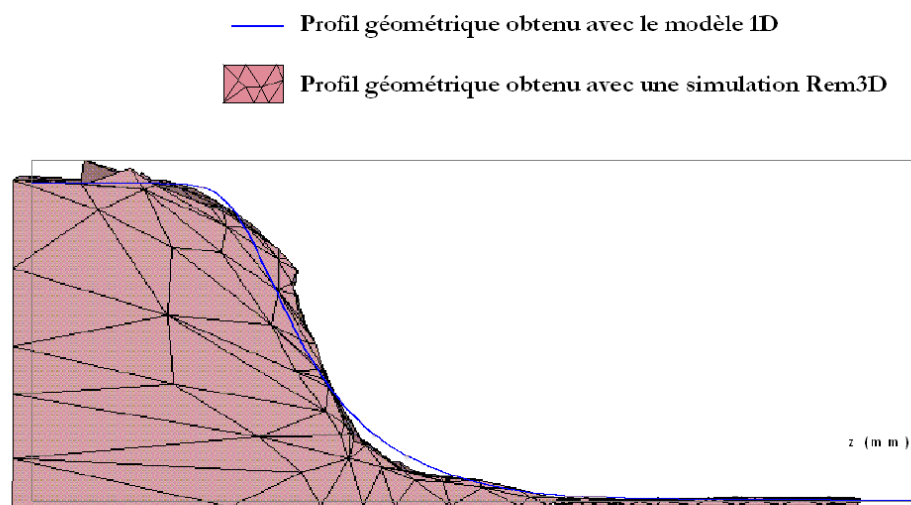
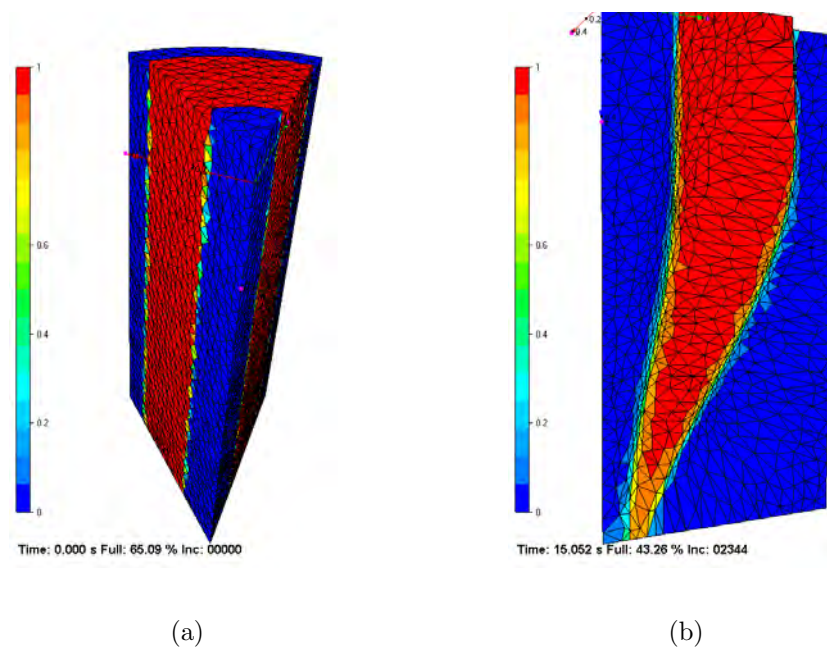
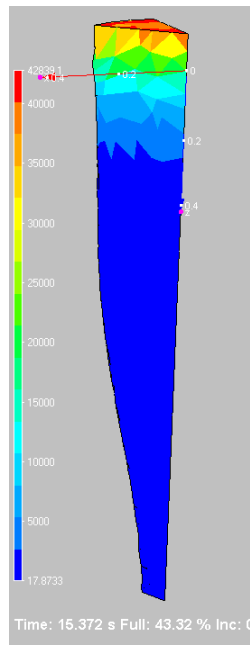


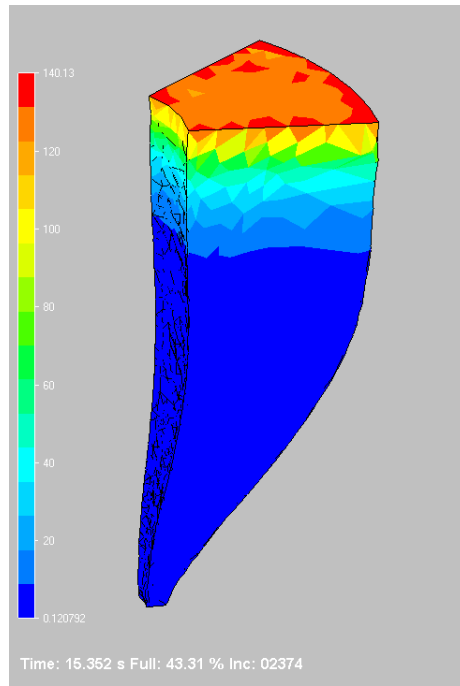
FIG. 5.9 – Comparaison du profil géométrique de la fibre obtenu par le modèle unidimensionnel avec celui obtenu par simulation REM3D®

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 5.10 et 5.12 :

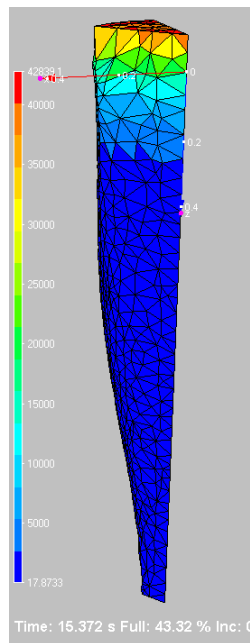




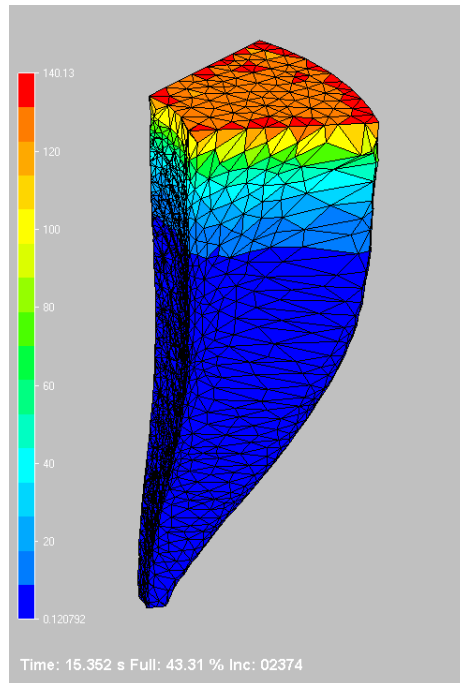
(c)



(d)



(e)



(f)

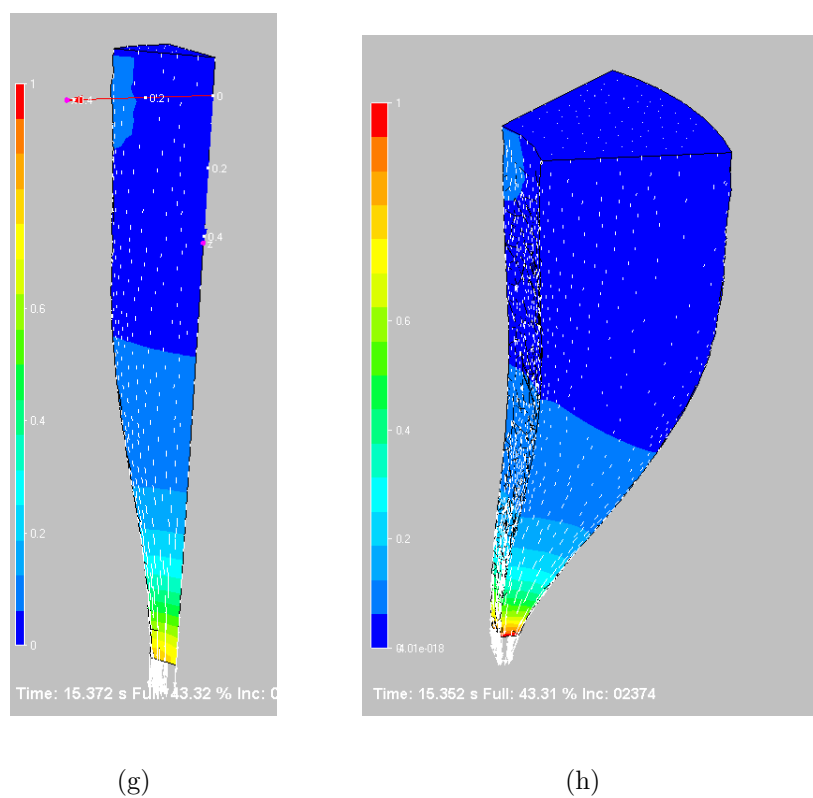


FIG. 5.10 – Simulation du fibrage : partie haute de l'écoulement

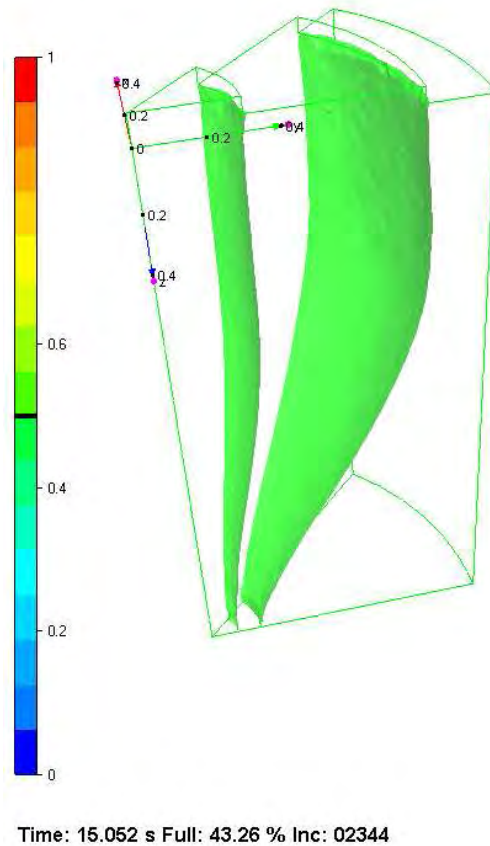


FIG. 5.11 – Visualisation des interfaces

Sur les figures 5.10(a) et 5.10(b), est représenté le maillage en début et en fin de simulation. Le module d'adaptation de maillage permet là aussi de limiter la diffusion aux interfaces et donc de mieux localiser le résultat de la simulation.

En fin de simulation, la réduction de diamètre est bien moins importante que dans le cas précédent. Nous n'avons alors pas les problèmes de convergence précédemment évoqués. Les résultats sont donnés pour chaque couche de verre afin de montrer la bonne définition des interfaces obtenues (figure 5.10).

Les figures 5.10(c) 5.10(d) montrent simplement les variations de viscosité dans chaque couche. Remarquons que l'échelle des couleurs ne représente pas le même intervalle de viscosité pour chaque couche de verre, la couche centrale étant plus visqueuse que la couche extérieure.

Sur les figures 5.10(e) et 5.10(f) apparaît le maillage en plus des variations de viscosité. Ce maillage n'est pas dégénéré, il est simplement déformé aux interfaces. Les détails de

ce maillage adapté en fin de simulation autour des interfaces apparaissent figure 5.12. Les éléments sont plus petits et plus nombreux autour des interfaces que dans le cœur du matériau.

Sur les figures 5.10(f) et 5.10(g) apparaît le champ de vitesse dans la direction verticale $\vec{z}$ (échelle de couleur) ainsi que les vecteurs vitesse du fluide définis aux nœuds du maillage. Le champ de vitesse dans la direction $\vec{z}$ a été imposé dans les plans d'entrée et de sortie, nous vérifions ici que les valeurs sont bien constantes dans ces plans à vitesse imposée : cela correspond à la vitesse de descente de la préforme dans le four pour le plan d'entrée et à la vitesse de fibrage pour le plan de sortie. Les vecteurs vitesse sont eux aussi conformes aux attentes puisqu'ils sont verticaux dans le plan d'entrée (pas de déformation de la fibre au niveau de l'interface avec la préforme solide), et non totalement verticaux dans le plan de sortie du fait de la réduction de diamètre dans ce plan là (déformation liée à l'étirage).

La figure 5.11 montre les interfaces seules à la fin de la simulation. Cette figure permet d'apprécier la forme finale de la fibre.

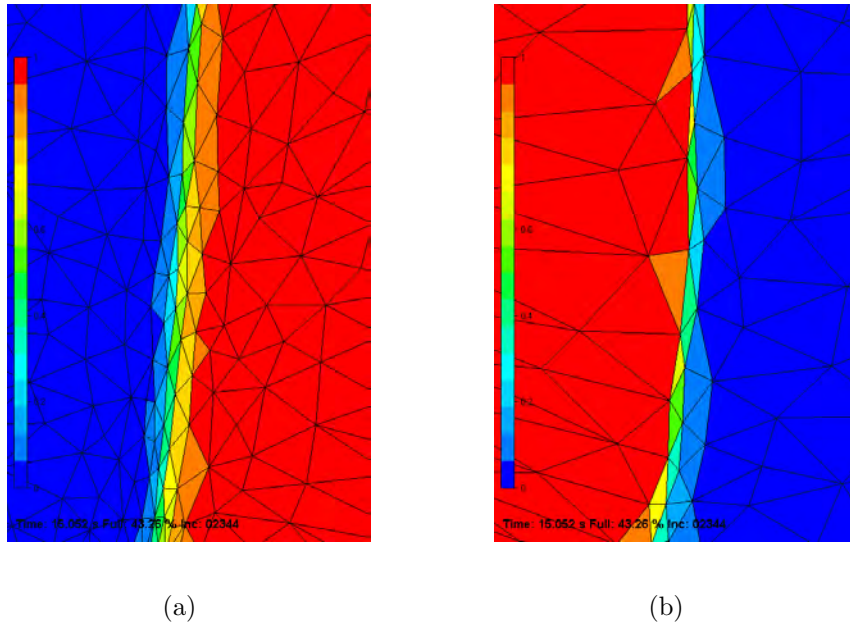


FIG. 5.12 – Détails du maillage aux interfaces en fin de simulation

Enfin, il est intéressant de comparer le diamètre final obtenu avec la simulation et le diamètre réel mesuré au cours du procédé réel. Après mesure, l'erreur relative est de 8%. D'ailleurs, en comparant le profil obtenu par la simulation avec celui obtenu avec le

modèle unidimensionnel, figure 5.13, le résultat est bien meilleur que celui obtenu pour la simulation à plus grande échelle (figure 5.9). Sachant que le modèle unidimensionnel atteint ses limites dans cette zone d'étude du procédé, nous ne pouvons pas tirer de cette comparaison des conclusions trop hâtives qui n'auraient pas lieu d'être.

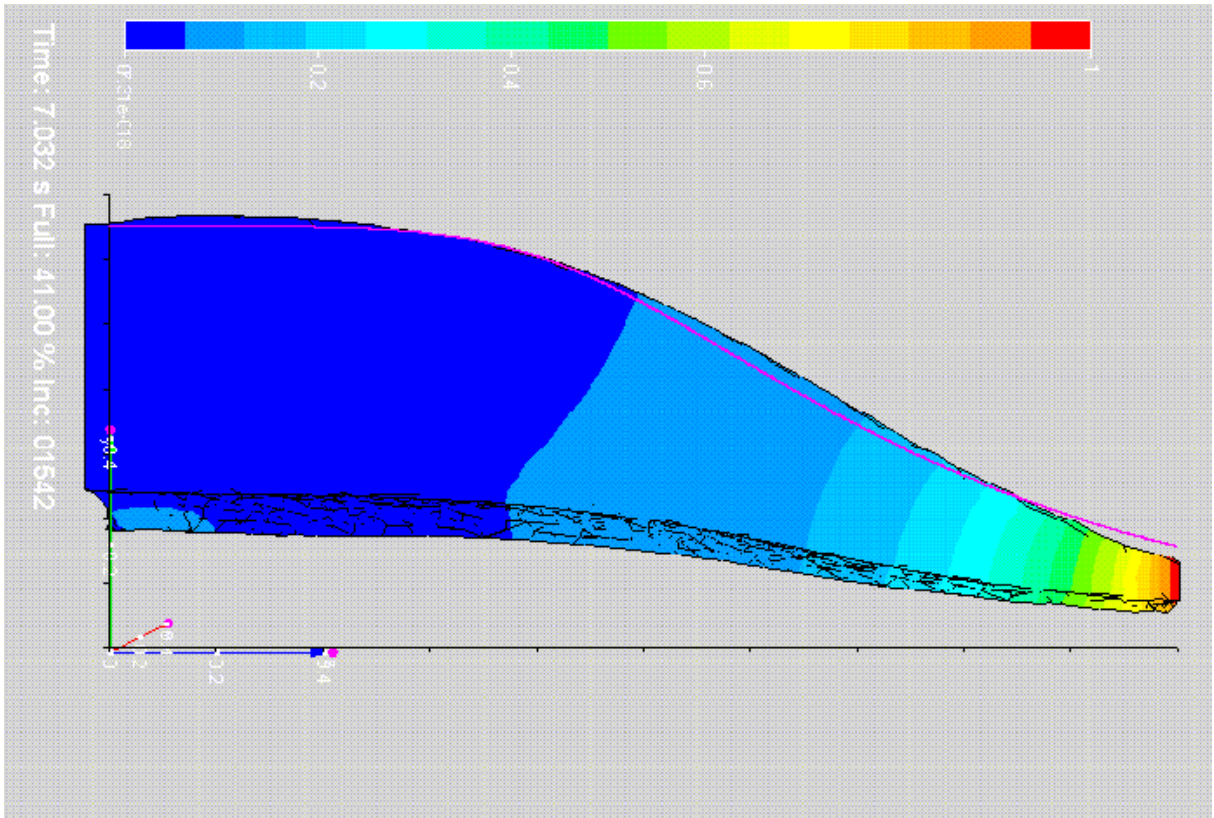


FIG. 5.13 – Comparaison du profil géométrique obtenu avec le profil issu du modèle 1D

5.5 Conclusion des simulations

Le logiciel REM3D[®] nous a permis de faire des simulations planes et axisymétriques d'étirage isotherme. Cela nous a conduit à retrouver les résultats classiques en ce qui concerne la stabilité du procédé isotherme à savoir que le procédé est stable pour un taux d'étirage inférieur à 20.22 et instable pour un taux d'étirage supérieur à cette valeur.

Nous avons ensuite effectué des simulations directes de l'étirage. Là, nous avons pris en compte la thermique du procédé par les variations de viscosité de chaque couche de