



Calcul et expériences sur le profil du front de résine en infusion

Florentin Berthet

► **To cite this version:**

Florentin Berthet. Calcul et expériences sur le profil du front de résine en infusion. Revue des composites et des matériaux avancés, Lavoisier, 2008, 18 (3), p.375-391. 10.3166/RCMA.18.375-391 . hal-01851427

HAL Id: hal-01851427

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01851427>

Submitted on 6 Nov 2019

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.

Calcul et expériences sur le profil du front de résine en infusion

Florentin Berthet

*Université de Toulouse
Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, CROMEP
Campus Jarlard, Route de teillet
F-81013 Albi CT cedex 09
Florentin.berthet@enstimac.fr*

RÉSUMÉ. L'infusion de résine liquide présente la particularité d'avoir une membrane souple en surface ce qui permet de visualiser directement l'écoulement de résine. L'écoulement de résine dans le textile est en retard par rapport au tissu drainant. Le calcul du décalage des fronts de résine dans les deux milieux est réalisé numériquement par une méthode simple. Ces simulations reproduisent à 80 % le décalage du front ainsi que le temps de remplissage. Une équation simple permettant de calculer le décalage en infusion est également proposée.

ABSTRACT. The liquid resin infusion specificity is to have a flexible membrane in surface that allows to show the flow of resin directly. The flow of resin in textile preform is late in comparison with drainage cloth. The calculation of the gap of the fronts of resin in both medias is numerically accomplished by one simple method. This simulation reproduces in 80 % the gap of the flow front as well as the time of filling. A simple equation allowing to calculate gap in infusion is also offered.

MOTS-CLÉS: composite, LRI, infusion, résine, liquide, décalage, front.

KEYWORDS: composite, LRI, infusion, liquid, resin, gap, flow front.

1. Introduction

Les procédés de fabrication de composites par voie liquide ont fait l'objet de bon nombre de travaux de recherche et cela depuis une vingtaine d'années. Il y a déjà beaucoup d'applications industrielles dans le domaine de l'aéronautique, de l'automobile, de l'industrie nautique, dans la fabrication de pales diverses (avions, éoliennes). Parmi les procédés de fabrication de composites par voie liquide, le procédé d'infusion de résine par le vide LRI (*liquid resin infusion*) bénéficie d'un intérêt particulier. En effet la technologie possède un avantage important au niveau des coûts d'outillages nécessaires pour fabriquer une pièce.

Alors qu'en RTM (*resin transfer molding*) le moule rigide est en deux parties, en infusion de résine par le vide, le moule est constitué d'une partie basse rigide, et d'une partie haute qui est un simple film. Cela implique un intérêt économique au niveau du coût de l'outillage évident. Le deuxième avantage de l'infusion est de pouvoir voir l'écoulement de la résine dans le drainant au travers de la bâche à vide transparente, ce qui n'est pas possible avec un moule en acier. Cet avantage est assez unique dans le domaine de la transformation des polymères et des composites, et dans le domaine du remplissage d'un moule. Le troisième avantage du procédé est sa capacité de réaliser de longs écoulements par l'utilisation d'un tissu drainant avec une perméabilité élevée.

2. Présentation du procédé d'infusion

Dans le procédé d'infusion le moule est recouvert d'un tissu d'arrachage, du renfort à imprégner, d'un autre tissu d'arrachage, d'un filet drainant et d'une bâche.

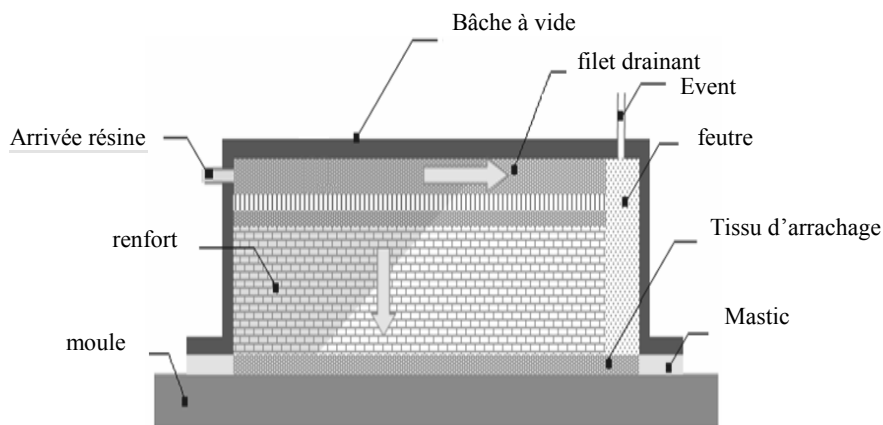


Figure 1. Schéma de principe de l'infusion de résine par le vide

Une des deux parties étant souple il est à noter que l'épaisseur de la pièce évolue dans le temps et dans l'espace en fonction du remplissage de la pièce (Govignon *et al.*, à paraître). La résine arrive d'un côté de la pièce alors que l'autre côté est relié à un système d'aspiration (pompe à vide). L'écoulement dans le drainant est en avance par rapport au front de résine dans le tissu à imprégner (figure 1). Cela donne, selon la dimension de cette avance, une impression fautive du remplissage de la pièce.

L'objectif de cet article est de calculer et de quantifier cette avance du drainant sur le tissu.

3. position du problème

Considérons un modèle composé de deux couches (figure 2) :

- une couche de drainant d'épaisseur e_d , avec des perméabilités K_{xx_d} et K_{yy_d} ;
- une couche correspondant aux tissus à imprégner d'épaisseur e_t avec des perméabilités K_{xx_t} et K_{yy_t} .

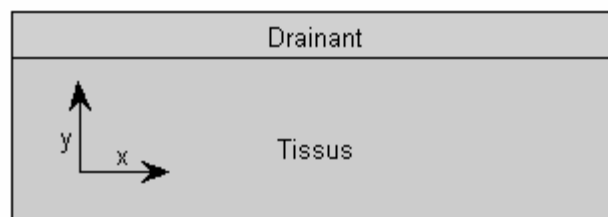


Figure 2. Bicouche de deux matériaux de perméabilités différentes

Les perméabilités des couches adjacentes présentent la particularité d'avoir des ordres de grandeurs qui sont très différents. Typiquement des rapports (K_{xx_d} / K_{xx_t}) de 10 à 100 (ou plus) peuvent être rencontrés entre la perméabilité dans le tissu drainant et la perméabilité du réseau fibreux à imprégner. Ce type de configuration pose des problèmes de dégénérescence d'éléments lors des calculs par éléments finis.

La vitesse d'écoulement d'un fluide traversant un milieu poreux est liée au gradient de pression et au tenseur perméabilité par l'équation [1].

$$\vec{v}_{\text{sortant}} = -\frac{[K]}{\mu} \overrightarrow{\text{grad}}(P) \quad [1]$$

Cette équation est bien connue comme « loi de Darcy ». Si on raisonne en termes de vitesse d'avancée du front dans le milieu poreux, on trouve cette relation, [2]

faisant intervenir le taux volumique de fibre (K_{vf}) dans le milieu des composites obtenus par voie liquide, qui donne la vitesse à laquelle on voit le fluide avancer dans le tissu. Cette relation donne en particulier la vitesse d'avancée du front.

$$\bar{v} = -\frac{[K]}{\mu} \frac{1}{1 - K_{vf}} \overrightarrow{\text{grad}}(P) \quad [2]$$

Compte tenu des perméabilités respectives, la vitesse d'écoulement est plus importante dans le drainant que dans le tissu. Il va donc se former un profil de front d'écoulement de la résine, avec une avance du front de résine dans le milieu drainant sur le front de résine dans le tissu à imprégner comme schématisé sur la figure 1. C'est ce profil que l'on se propose de déterminer.

Dans le tissu à imprégner la pression chute du niveau de pression au niveau du pot de résine jusqu'à zéro au niveau du front de résine (figure 3).

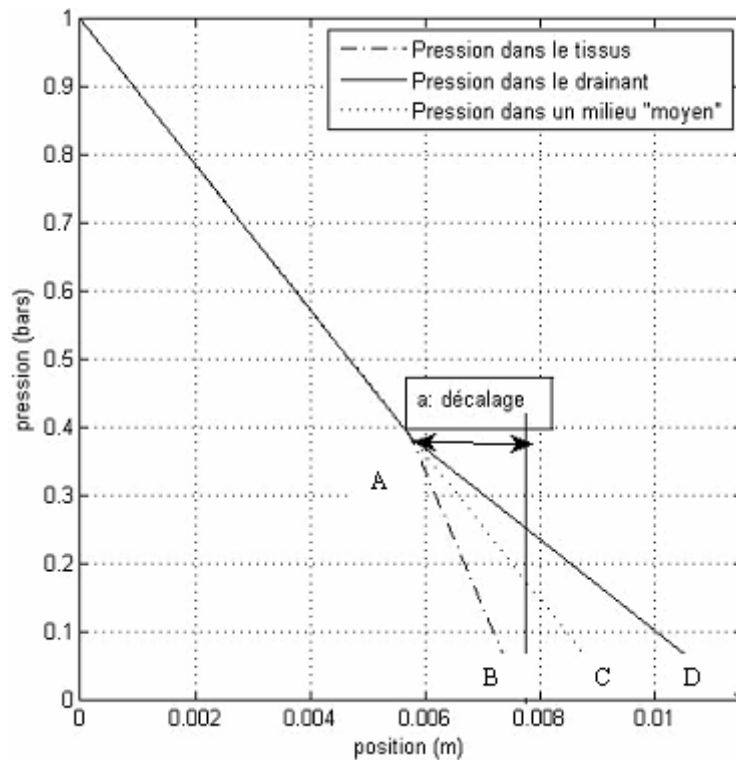


Figure 3. Profil de pression supposé dans un empilement de drainant et de tissu

Comme le front de résine possède un profil visible sur les figures 1 et 4, son abscisse x se trouve entre le point le plus avancé dans le drainant tout en haut (point D), et le point le moins avancé du tissu (au bas du tissu point B).

Le profil de pression supposé dans le bicouche a l'allure représentée sur la figure 3 et le gradient de pression supposé est représenté sur la figure 4.

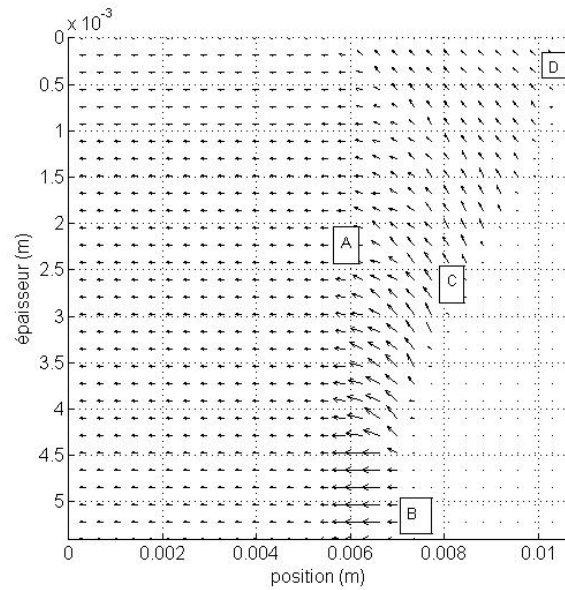


Figure 4. Allure du gradient de pression dans l'épaisseur

Entre le seuil (abscisse 0) et A la pression décroît (figure 3) mais elle est constante dans l'épaisseur. Entre A et le front, la pression n'est plus constante dans l'épaisseur, c'est la zone de perturbation au voisinage du front.

La longueur entre la position du front de résine la plus en retard dans le tissu (B) et le point (A) où la pression dans les couches commence à diverger dans l'épaisseur est appelée décalage a (figures 3 et 4). Ce décalage a entre A et B est supposé s'exprimer :

$$a = e_t * \sqrt{\frac{Kyy_t}{Kxx_d}} \quad [3]$$

Cette équation est inspirée de celle donnée par Dimitrovova *et al.* (2004). Elle relève également de l'analyse selon laquelle le décalage doit faire intervenir

l'épaisseur du tissu, la perméabilité transverse du tissu, la perméabilité dans le sens long du drainant. Elle doit également satisfaire à une certaine simplicité.

La zone du front est une zone de perturbation. Alors qu'en amont d'un plan passant par le point A il n'y a pas de gradient transverse, donc pas d'écoulement transverse, en aval de ce plan se produisent des écoulements transverses du drainant vers les tissus situés en dessous.

Le gradient de pression a uniquement une composante selon x avant A, et des composantes selon x et selon y après A (figure 4).

Il y a ralentissement de l'écoulement selon x dans le drainant, alimentation transverse du tissu et accélération de l'écoulement selon x dans le tissu. En régime stabilisé cela conduit à une vitesse d'avancée du front constante dans l'épaisseur dans la direction (x) parallèle au moule.

La ligne de front est divisée en différents segments. Les vitesses d'avancées des extrémités des segments sont calculées au moyen de la loi de Darcy [2], des hypothèses prises sur le profil de pression (figure 3 et équation du décalage [3]) qui donnent le gradient de pression. Dans l'épaisseur, la pression est supposée linéaire entre le point A et le front de matière.

$$\begin{pmatrix} x(t + dt) \\ y(t + dt) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \end{pmatrix} dt \quad [4]$$

Dans ces conditions le gradient de pression s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dx}(i+1) &= P_A * \frac{1}{x_A - x_{i+1}} \\ \frac{dP}{dy}(i+1) &= P_A * \frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1} - x_A} * \frac{1}{y_{i+1} - y_i} \end{aligned} \quad [5]$$

avec

$$P_A = (P_{entrée} - P_{aspiration}) * \frac{(x_c - x_A)}{x_C} \quad [6]$$

avec $P_{aspiration} = P_{front} = 0$ [7]

donc

$$P_A = P_{\text{entrée}} * \frac{(x_c - x_A)}{x_c} \quad [8]$$

La combinaison des équations [5], [2], [8] et [4] permet de calculer l'avancée du front de résine à partir de sa position au pas de temps précédent et donc son profil au cours du temps. X_c est l'abscisse moyenne du front. Le profil de pression supposé permet de prendre en compte le ralentissement de l'écoulement dans le drainant, l'accélération de l'écoulement dans le tissu et l'écoulement transverse du drainant vers le tissu.

4. Validation

Les hypothèses prises, notamment pour le profil de pression et pour le décalage pouvant sembler radicales, nous allons valider ce calcul par comparaison avec la littérature et avec l'expérience. L'intérêt de ce modèle est la compréhension des écoulements qui se produisent au niveau du front de résine.

4.1. Validation expérimentale

Soit un empilement de tissus de verre quadriaux de 8 mm d'épaisseur de taux de fibre de 50 % avec une couche de drainant d'épaisseur 1 mm, de taux de fibre 13 %. La perméabilité du tissu est de $6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ dans le plan et dans l'épaisseur. Le drainant a une perméabilité de $7 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ dans le plan et dans l'épaisseur.

L'expérience montre que ce tissu injecté en nappe rempli sur 40 cm présente une avance de 30 à 50 mm du front dans le drainant sur le front dans le tissu. L'étendue du front est donc de 30 à 50 mm. La simulation réalisée avec les paramètres cités donne une valeur d'étendue de 38 mm.

4.2. Validation bibliographique

4.2.1. Calado et Advani

Les calculs théoriques notamment ceux avec la formule [9] (Calado *et al.*, 1996) simplifiée, qui est également à rapprocher de notre formule de décalage a [3].

$$\text{étendue} = H * \sqrt{\frac{(K_{xx\text{drainant}} - K_{xx\text{tissu}})}{4 * K_{yy_t}}} \quad [9]$$

avec $H = e_t + e_d$, ce qui nous donne une valeur d'étendue du front de 48 mm.

4.2.2. Dimitrovova et al.

Des formules plus complexes comme celles de Dimitrovova *et al.*, (2000) [10, 11 et 12], ou de Grujicic (2005) [13] donnent des valeurs plus éloignées de l'ordre de 0.1 m pour Dimitrovova (pour $h = 8$ mm) ou 0.01 m pour Grujicic.

$$1_d = \frac{e_t}{2\sqrt{10}} \sqrt{\frac{K_{xx_d} + 49K_{xx_t} + \sqrt{K_{xx_d}^2 + 98K_{xx_t}K_{xx_d} + K_{xx_t}^2}}{K_{yy_t}}} \quad [10]$$

$$2_d = \frac{5e_t}{2\sqrt{10}} \frac{K_{xx_d} + K_{xx_t} + \sqrt{K_{xx_d}^2 + 98K_{xx_t}K_{xx_d} + K_{xx_t}^2}}{\sqrt{K_{yy_t}(K_{xx_d} + 49K_{xx_t} + \sqrt{K_{xx_d}^2 + 98K_{xx_t}K_{xx_d} + K_{xx_t}^2})}} \quad [11]$$

La formule est valable si l'épaisseur du tissu est égale à l'épaisseur du drainant. La formule de Dimitrovova donne l'étendue comme :

$$^2d - ^1d \quad [12]$$

La formule concerne un cas où l'épaisseur de drainant est égale à l'épaisseur de la préforme fibreuse (tissu), donc elle n'est pas vraiment adaptée à notre exemple. Avec une épaisseur h considérée à la moitié de l'épaisseur de l'ensemble ($2h = 9$ mm, donc $h = 4,5$ mm) on trouve un retard qui s'approche davantage de 57 mm.

4.2.3. Grujicic et al.

$$\text{étendue} = e_t * \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{K_{yy_t} e_d}{K_{xx_t} e_t}}\right) + \sqrt{\left(1 - \sqrt{\frac{K_{yy_t} e_d}{K_{xx_t} e_t}}\right)^2 + \pi \left(\sqrt{\frac{K_{yy_t} e_d}{K_{xx_t} e_t}}\right)}}{\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{K_{yy_t}}{K_{xx_t}}}} \quad [13]$$

En fait la formule [13] de Grujicic (Grujicic *et al.*, 2005) n'est pas adaptée au calcul de l'étendue du front, c'est une formule initialement destinée à calculer la distance à partir de laquelle on a un front de résine uniforme dans l'épaisseur (Ni *et al.*, 1997).

Compte tenu de l'incertitude qu'on a expérimentalement quant à la mesure du décalage (le front n'étant jamais net), le calcul développé paraît suffisamment précis.

4.2.4. Formule empirique

Le travail sur ces équations donne l'idée de la formule de l'étendue suivante :

$$\frac{\text{étendue}}{e_{\text{textile}}} = \sqrt{\frac{K_{xx\text{drainant}}}{K_{yy_t}}} \quad [14]$$

Cette formule traduit le fait que dans un milieu anisotrope le front de matière prend une forme d'ellipse avec comme rapport des axes de l'ellipse la racine des rapports des perméabilités.

Il faut ajouter un coefficient pour prendre en compte les différences d'épaisseur des milieux. En prenant en compte les débits on obtient :

$$\text{étendue} = e_{\text{textile}} * \sqrt{\frac{e_{\text{drainant}} * K_{xx\text{drainant}}}{e_{\text{textile}} * K_{yy_t}}} \quad [15]$$

Cette formule est assez simple et présente un intérêt pratique qui la rend utilisable. L'application de cette formule au cas correspondant à nos conditions expérimentales donne une valeur de décalage de 30 mm. En prenant en compte les taux volumiques de fibre :

$$\text{étendue} = e_{\text{textile}} * \sqrt{\frac{e_{\text{drainant}} * K_{xx\text{drainant}} * (1 - K_{vf\text{textile}})}{e_{\text{textile}} * K_{yy_t} * (1 - K_{vf\text{drainant}})}} \quad [16]$$

L'application de ces formules [15,16] à la configuration définie en 4.1 donne une étendue du front de résine (retard ou avance) de 30 mm pour [15] et de 23 mm pour [16], ce qui correspond à l'expérience (30 à 50 mm selon l'endroit mesuré sur la plaque).

4.2.5. Chensong Dong

Nous pouvons également comparer nos résultats de calculs à ceux obtenus par Chensong Dong (Dong, 2006).

Les perméabilités, épaisseurs, Kvf utilisés par Dong *et al.*, (2006) sont rassemblés dans le tableau 1.

Milieu	Kxx (m2)	Kyy (m2)	épaisseur (m)	Kvf	Retard (m)
Tissus	5,00E-11	5,00E-11	0,001	0,5	0,002
Drainant	1,00E-09	1,00E-09	0,0002	0,5	
Tissus	5,00E-11	5,00E-11	0,001	0,5	0,00307
Drainant	1,00E-09	1,00E-09	0,001	0,5	
Tissus	5,00E-11	5,00E-11	0,001	0,5	0,00132
Drainant	1,00E-09	1,00E-09	0,0002	0	
Tissus	5,00E-11	5,00E-11	0,001	0,5	0,00212
Drainant	1,00E-09	1,00E-09	0,001	0	
Tissus	5,00E-11	5,00E-11	0,001	0,5	0,00386
Drainant	3,00E-09	3,00E-09	0,0002	0,5	
Tissus	5,00E-11	5,00E-11	0,001	0,5	0,00572
Drainant	3,00E-09	3,00E-09	0,001	0,5	
Tissus	5,00E-11	5,00E-11	0,001	0,5	0,00332
Drainant	3,00E-09	3,00E-09	0,0002	0	
Tissus	5,00E-11	5,00E-11	0,001	0,5	0,00428
Drainant	3,00E-09	3,00E-09	0,001	0	
Tissus	5,00E-11	5,00E-11	0,001	0,5	0,00356
Drainant	3,00E-09	3,00E-09	0,0006	0,25	

Tableau 1. Perméabilités, épaisseurs, Kvf utilisés par Chensong Dong

La figure 5 montre une relative corrélation entre les résultats obtenus par notre calcul numérique et ceux obtenus par Chensong Dong. L'écart entre les points les plus éloignés de la corrélation parfaite matérialisée par la première diagonale en pointillée est de l'ordre de 1 mm. L'expérience montre que cette précision est acceptable. La figure 6 montre l'utilité de la formule empirique [16] compte tenu des différentes configurations balayées par le tableau 1.

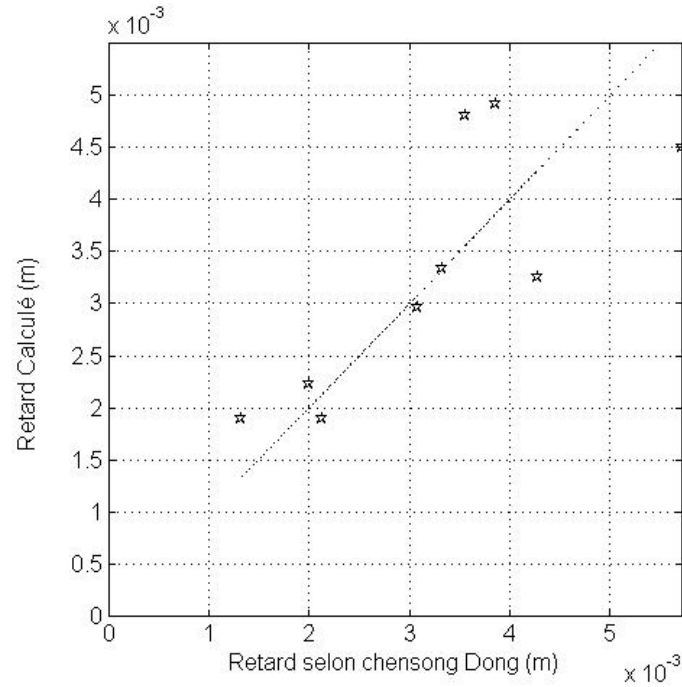


Figure 5. Comparaison des retards calculés dans cette étude et calculés par Chensong Dong

4.2.6. PAM-RTM

Nous avons également réalisé la comparaison de nos calculs aux résultats obtenus avec le logiciel PAM-RTM. Delta P = 0.9bars viscosité = 0.1Pa.s

	Kxx (m2)	Kyy (m2)	Epaisseur (mm)	Kvf
Tissu 2	1 ^e -12	1 ^e -12	2.5	0.4
Tissu 1	1 ^e -11	1 ^e -11	2.5	0.4
Drainant	1 ^e -9	1 ^e -9	1	0.1

Tableau 2. Perméabilités, épaisseurs, Kvf utilisés pour PAM-RTM

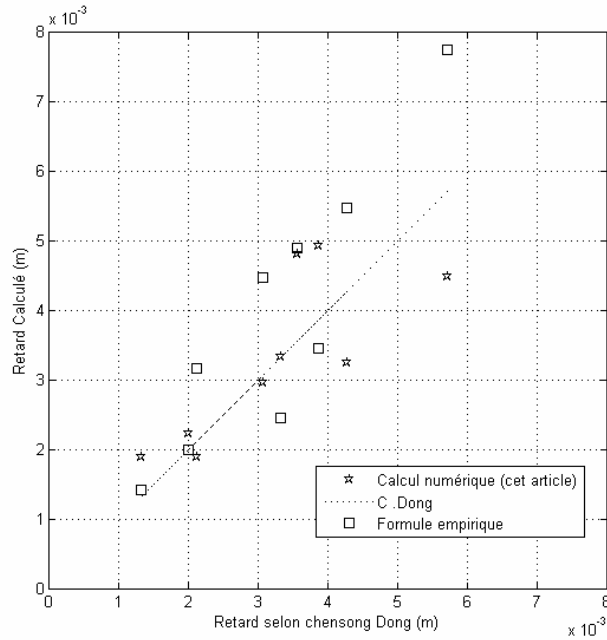


Figure 6. Comparaison des retards calculés dans cette étude, avec la formule empirique [16] et calculés par C. Dong

	Retard (mm)	Temps remplissage (s)	Retard (mm)	Temps remplissage (s)
PAM-RTM	15	14	49	10.13
Cette simulation	12	11.2	35	8

Tableau 3. Comparaison PAM-RTM à notre simulation numérique

Nous pouvons constater que sur ces deux exemples notre simulation sous-estime le temps de remplissage et l'étendue du front de résine. Les valeurs obtenues représentent environ 80 % des valeurs obtenues avec PAM-RTM. Ce qui n'est déjà pas si mal, compte tenu des raccourcis pris. Nous pouvons désormais passer à la simulation de positions de fronts successifs.

5. Formation du profil de front de résine

5.1. Cas d'une couche de tissu

	Kxx (m2)	Kyy (m2)	épaisseurs (m)	Kvf
Drainant vert	8,00E-10	8,00E-10	0,001	0,191808
Drainant bleu	7,00E-10	7,00E-10	0,001	0,107735
Drainant blanc	4,00E-10	4,00E-10	0,001	0,079664
Tissus	8,00E-12	8,00E-12	0,0007	0,4

Tableau 4. Caractéristiques des tissus et des drainants utilisés

Considérons un drainant (bleu) d'épaisseur 1 mm au dessus d'une épaisseur de tissu de 0.7 mm d'épaisseur, avec les perméabilités sens long et transverses telles qu'apparaissant sur la figure suivante et/ou dans le tableau 4. Cet ensemble est infusé par une résine de 0.1 Pa.s sous un différentiel de pression de 10^5 Pa. On obtient des profils de front successifs tels que représentés sur la figure 7.

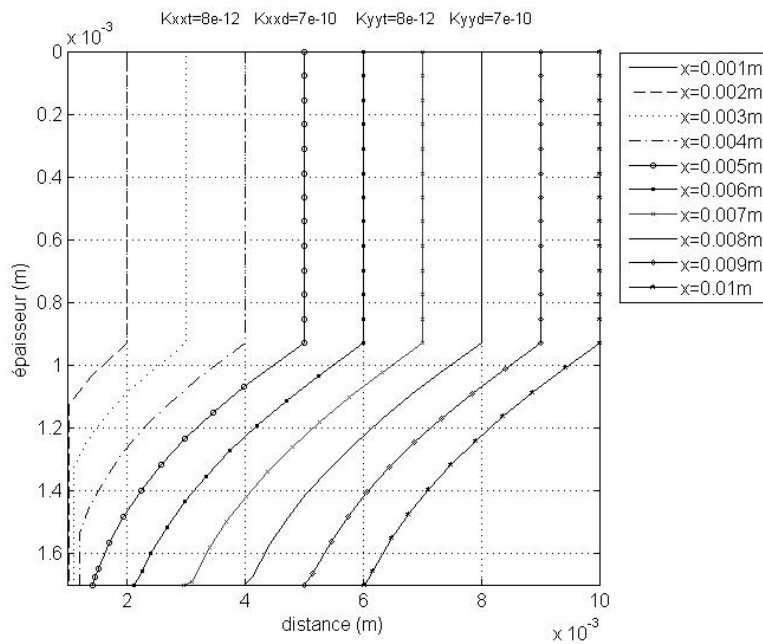


Figure 7. Positions successives des fronts matière vues de côté dans l'épaisseur pour 1 plis de tissu sur le premier cm de remplissage

Un retard du front de résine dans le tissu par rapport au drainant de 4 mm est observé.

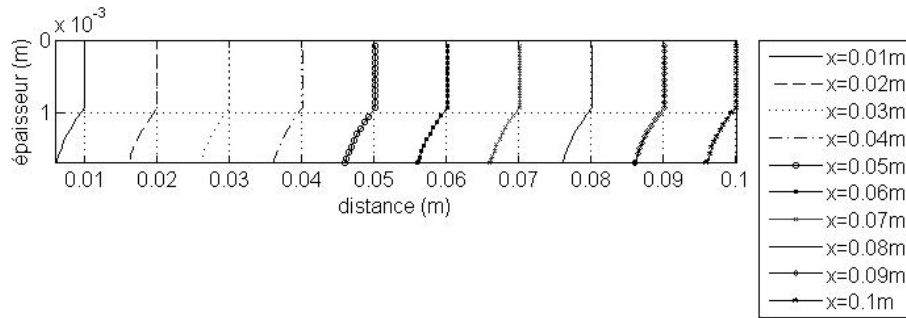


Figure 8. Positions successives des fronts matière vus de côté dans l'épaisseur pour 1 plis de tissu sur les 10 premiers cm

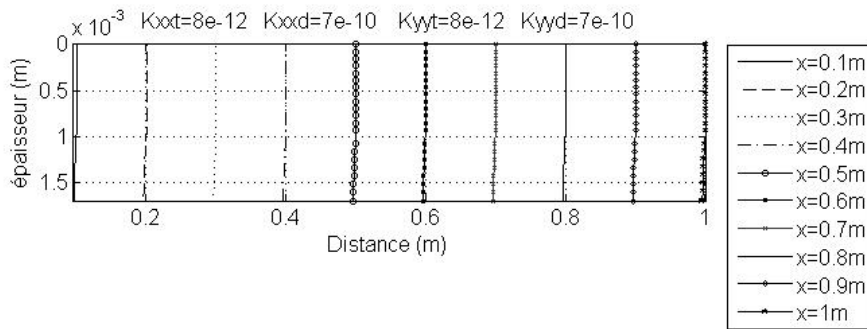


Figure 9. Positions successives des fronts matière vus de côté dans l'épaisseur sur 1 m

Ces simulations montrent que le front de résine se forme rapidement (sur le premier centimètre rempli) et qu'ensuite sur le reste du remplissage il n'évolue pratiquement plus.

5.2. Cas de deux couches de tissu

Considérons maintenant une épaisseur de 1.4 mm de tissu (deux couches). Les perméabilités correspondent à un autre tissu drainant (drainant blanc du tableau 4) avec une perméabilité plus faible.

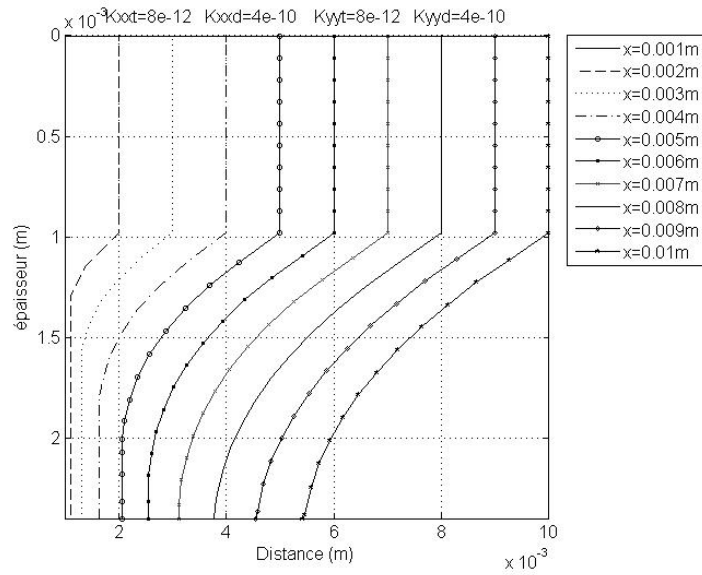


Figure 10. Positions successives des fronts matière vus de côté dans l'épaisseur sur 1 cm

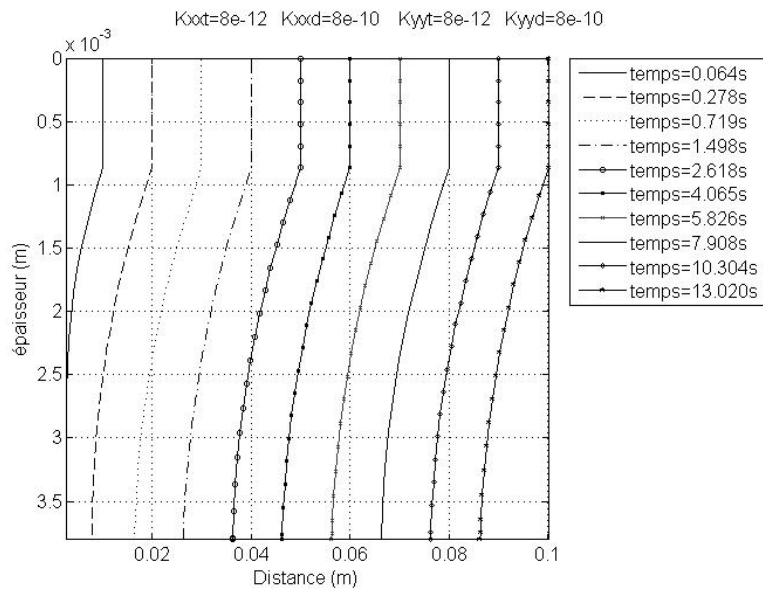


Figure 11. Positions successives des fronts matière vus de côté dans l'épaisseur sur 10 cm pour 4 couches de tissus (2.8 mm de tissus et 0.8 mm de drainant)

Le retard du front dans le tissu par rapport au drainant est légèrement plus grand de l'ordre de 4,6 mm. La baisse de perméabilité du tissu drainant compense le doublement d'épaisseur du tissu à imprégner, si bien que le retard du front est sensiblement égal au cas précédent.

5.3. Cas de 4 couches de tissu

Cas de l'épaisseur de 2,8 mm de tissu, on double donc à nouveau l'épaisseur de tissu. Les figures 11 et 12 montrent les profils des front de matière successifs pour quatre épaisseurs de tissus.

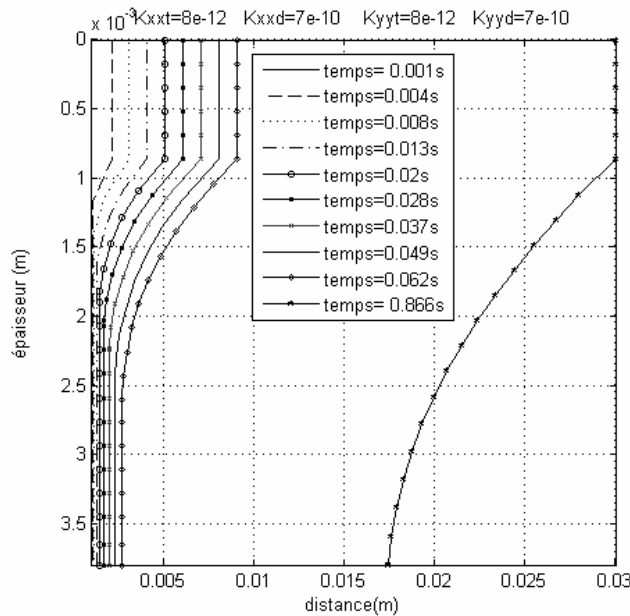


Figure 12. Positions successives des fronts matière vus de côté dans l'épaisseur sur 3 cm pour 4 couches de tissus (2.8 mm de tissus et 1mm de drainant)

L'épaisseur de tissu est multipliée par 4, le retard passe de 4 mm à 13 mm. Les simulations réalisées montrent bien l'influence des différents paramètres (perméabilités, épaisseurs) sur l'étendue du front de résine au cours du remplissage. Ces simulations vont dans le même sens que ce que contient l'équation [16]. L'étendue augmente avec l'épaisseur des tissus à imprégner, avec le rapport des perméabilités sens long à la perméabilité transverse et est également fonction des épaisseurs de drainant et de tissu.

6. Conclusion

Au regard de ces simulations et des formules empiriques [15] et [16], il apparaît que le calcul numérique effectué sous-estime le retard du front dans le tissu par rapport au drainant. Le calcul numérique proposé capte une bonne partie des phénomènes présents lors du remplissage en infusion puisque le retard calculé numériquement représente 80 % de la valeur prédite par éléments finis (PAM RTM). Néanmoins l'ordre de grandeur est suffisamment correct pour pouvoir se comparer favorablement à l'expérience.

La formule empirique proposée a tendance à surestimer le retard du front de résine. D'un point de vue de la pratique, la formule empirique donne rapidement l'ordre de grandeur du retard, ainsi que le sens d'influence des différents facteurs. Par ailleurs, il est important de noter que le retard est en général de l'ordre de grandeur de quatre fois l'épaisseur du tissu à imprégner

Il est aussi important pratiquement, surtout pour des pièces épaisses, de considérer le retard spatial pris par le tissu par rapport au drainant qui lui est visible. Pour fixer les esprits, pour une pièce de 25 mm d'épaisseur, le retard peut être de 10 cm, ce qui peut amener des défauts en bord de pièce (emprisonnement de gaz, problèmes d'imprégnation).

7. Bibliographie

- Calado V.M.A., Advani S.G., "Effective average permeability of multi layer performs in resin transfer molding", *Composites science and technology* 56, 1996, 519-531.
- Dimitrovova Z., Faria L., "Finite element modeling of the resin transfer molding process based on homogenisation techniques", *Computers and structures*, 76, 2000, 379-397.
- Dimitrovova Z., Advani S.G., "Mesolevel analysis of the transition region formation and evolution during the liquid composite molding process", *Computers and structures* 82, 2004, 1333-1347.
- Dong C.J., "Development of a process model for the vacuum assisted resin transfer molding by the response surface method", *Composites part A* 37, 2006, p. 1316-1324.
- Govignon Q., Bickerton S., Morris J., "Full field Monitoring of the resin Flow and laminate properties During the resin infusion process", *Composites : part A*, to appear.
- Grujicic M., Chittajallu K.M., Walsh S., "Non-isothermal preform infiltration during the vacuum assisted resin transfer molding (vartm) process", *Applied surface science* 245, 2005, p. 51-64.
- Ni J. , Zhao Y., Lee L.J., Nakamura S., "Analysis of two regional flow in liquid composite molding", *Polymer composites*, april 1997, vol. 18, n° 2 p. 254-269.
- Yenilmez B., Senan Murat, Murat Sozer E., "Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum Infusion process", *Composites Science and technology*, to appear.