

Couplage multiphysique en régime transitoire: application aux procédés par infusion

R. Mezher¹, N. Moulin¹, J. Bruchon¹, S. Drapier¹

¹ Centre SMS LGF & UMR CNRS 5307,
Mines Saint-Etienne - Université de Lyon,
158, Cours Fauriel, CS 62362,
F-42023 Saint-Etienne cedex 2,
Chaire Hexcel-Mines Saint-Etienne,
{rabih.mezher, nmoulin, bruchon, drapier}@emse.fr

Résumé — Les procédés d'élaboration de structures composites dits 'par voie liquide' se caractérisent (Celle *et al.* 2008) par l'écoulement d'un fluide thermo-réactif entre une zone fluide (Stokes) et une zone orthotrope non-linéaire poreuse très faiblement perméable, saturée (Darcy) et sèche, ceci dans un contexte de grandes transformations. Dans l'objectif de mener des études industrielles, ce travail se focalise sur le couplage de 3 de ces problèmes de base - Stokes/Darcy, mécanique des solides, *level-set* - par transfert de variables, dans un environnement de programmation par échanges de messages.

Mots clés — Couplage multiphysique, MPI, matériaux composites, infusion de résine.

1 Introduction

Durant la dernière décennie, les matériaux composites ont connu un essor remarquable, notamment sous l'impulsion de l'industrie aéronautique où le gain de masse, et plus globalement le gain économique qu'ils procurent, les rendent compétitifs. Cet essor passe dorénavant par la maîtrise des procédés de fabrication, pour des structures primaires à base de composites à matrice organique de plus en plus complexes et de grande taille, et de plus en plus sollicitées. Les procédés historiques [3, 1, 2] dits *par voie sèche* permettent d'obtenir des pièces de haute qualité mais à des coûts associés qui deviennent pénalisants. Au contraire, les procédés dits *par voie liquide* tendent à devenir concurrentiels économiquement [3], mais leur maîtrise pose encore problème. Pourtant, seule la maîtrise de ces procédés permet de viser des applications haute-performances, et tolérant donc peu de défauts, qui plus est dans une démarche d'augmentation des cadences et de réduction des coûts.

Les procédés visés ici, dits *par infusion de résine*, consistent à n'utiliser que la pression atmosphérique comme force motrice. Comme illustré sur la Figure 1, grâce à la mise sous vide, les préformes sèches (préformes fibreuses orthotropes) placées dans un 'moule' fermé par une bâche, sont imprégnées par la résine à l'état liquide aspirée par la dépression créée dans le moule. En général, l'écoulement de la résine est orienté dans le sens transverse au plan des nappes de renforts, pour une double raison : faciliter l'imprégnation de grandes pièces et réduire les distances parcourues par la résine dans les préformes. Le contrôle du parcours de la résine se fait par l'intermédiaire de drainants (Figure 1). Sous l'action de la pression atmosphérique et de la pression interne de la résine, les préformes fibreuses subissent des grandes transformations. On peut résumer ainsi les phénomènes rencontrés dans ces procédés : écoulement d'un fluide thermo-réactif entre une zone fluide (Stokes) et une zone orthotrope non-linéaire poreuse très faiblement perméable, saturée (Darcy) et sèche, dans un contexte de grandes transformations.

Afin de représenter au mieux ces physiques, un effort substantiel a été réalisé ces dernières années [3, 2, 4]. Actuellement, leurs couplages dans des régimes assez sévères (milieu orthotrope qui se rigidifie lors de la compaction, perméabilités orthotropes très faibles ($\leq 10^{-15} m^2$) constituent le point limitant des calculs. Dans l'objectif de mener des études industrielles, ce travail se focalise sur le couplage de 3 de ces problèmes de base - Stokes/Darcy, mécanique des solides, *level-set* - par transfert des paramètres et variables, dans un environnement de programmation par échanges de messages.

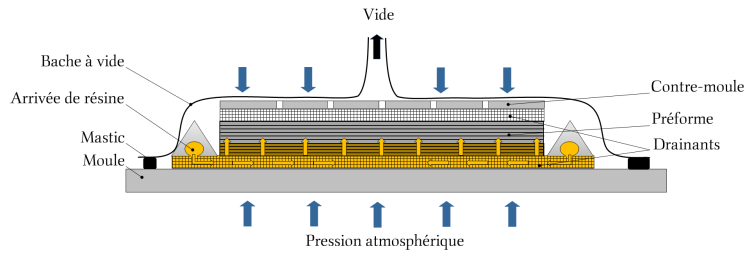


FIGURE 1 – Procédé par infusion de résine [1]

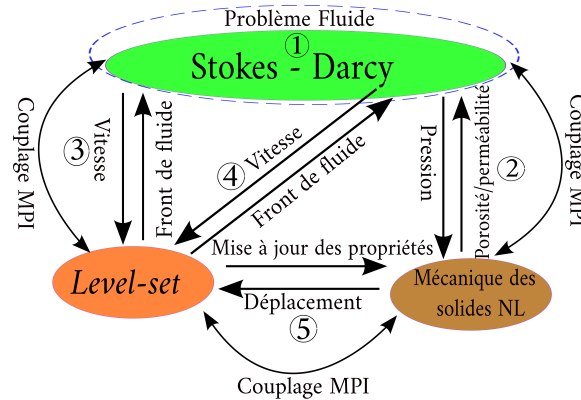


FIGURE 2 – Couplages mécanique des fluides / mécanique des solides Non-Linéaire (NL) / *Level-set* en régime transitoire

2 Couplage multiphysique

La modélisation du procédé que nous venons de décrire ci-dessus doit prendre en compte différents couplages physiques. Ces couplages (dans des conditions isothermes) sont généralement (Figure 2) :

- ① couplage entre deux régimes d'écoulement différents : l'écoulement de la résine dans un domaine de perméabilité élevée (Stokes) et dans les préformes fibreuses orthotropes de faible perméabilité (Darcy) ; ce couplage est réalisé au moyen d'une formulation par éléments finis monolithique stabilisée par une méthode multi-échelle ASGS [2]. Les problèmes de Stokes et Darcy sont donc résolus simultanément et donc couplés fortement ;
- ② couplage entre la mécanique des solides Non-Linéaire (NL) et la mécanique des fluides (régime de Darcy) dans les préformes saturées. D'une part, la pression de la résine (exercée par le fluide) déforme les préformes et modifie leur porosité, et donc leur perméabilité qui contrôle l'écoulement. D'autre part, cette pression modifie de manière significative le comportement mécanique des préformes saturées sollicitées par la pression atmosphérique. Ce comportement est modélisé par un modèle de Terzaghi [5] ;
- ③ et ④ couplage fluide / *Level-set*, où la *Level-set* [2] est une méthode qui sert à représenter à la fois l'interface relativement peu mobile entre le drainant (Stokes) et les préformes (Darcy), et le front du fluide qui parcourt tout le domaine, entraîné par le champs de vitesse du fluide ;
- ⑤ couplage *Level-set* / mécanique des solides NL : lors de la compression des préformes, le maillage subit une déformation qui doit être pris en compte lors de la convection de la *Level-set*.

Dans ce travail, l'objectif est de réaliser une plateforme de couplage robuste de plusieurs problèmes, efficace (minimisant les temps d'échanges de communications) et permettant de travailler dans un second temps dans un cadre de calcul intensif pour chacun des problèmes.

3 Techniques de couplage

Pour étudier numériquement le couplage multiphysique des problèmes cités auparavant (Figure 2), plusieurs approches existent dans la littérature [6] :

- la méthode monolithique qui traite l'ensemble du problème comme un bloc unique [2, 4] ;
- la méthode partitionnée qui cherche à isoler les différents champs les uns des autres [3, 7].

La méthode monolithique est caractérisée par l'intégration simultanée des différentes équations ; cela a pour avantage l'élimination d'instabilités supplémentaires à un système déjà complexe. La méthode de couplage partitionnée consiste à écrire séparément chaque physique, ce qui permet de résoudre les physiques en temps séparé où l'influence de chacune des physiques sur l'autre se fait à travers des conditions d'interface [8, 9]. L'approche monolithique est utilisée ici pour coupler les problèmes Stokes - Darcy (le problème fluide ①), tandis que la méthode partitionnée est employée pour le couplage des problèmes restants (Figure 2).

Une fois que les couplages sont définis, un choix judicieux doit être fait pour la méthode de programmation chargée d'établir les échanges entre les différents problèmes. Dans ces travaux, les méthodes partitionnées sont privilégiées car elles présentent les avantages suivants par rapport aux méthodes monolithiques [8, 9] : (i) la flexibilité de la modélisation des différents phénomènes physiques (par exemple un modèle éléments finis coté solide et un modèle éléments finis coté fluide) ; (ii) l'indépendance de la modélisation de chaque physique, permettant l'utilisation de modèles non coïncidents ; (iii) la possibilité de réutiliser des codes existants et (iv) l'extensibilité : ce qui signifie la possibilité de développer de nouveaux modèles dans chaque code, indépendamment de l'aspect couplage.

Il existe différentes méthodes pour échanger les différents champs et / ou paramètres entre les problèmes couplés. Plusieurs approches sont possibles :

1. les échanges de données par fichiers : ce qui implique des opérations de lecture/écriture de champs scalaires ou vectoriels ;
2. les échanges de données par la méthode décrite dans les derniers travaux de Blais *et al.*[1] ;
3. les échanges par l'intermédiaire des bibliothèques de transfert de données, qui permettent de gérer la communication entre les différents codes des problèmes couplés.

Avec les méthodes 1 et 2, il est difficile de réaliser des calculs sur plusieurs machines. En outre, elles sont relativement coûteuses en terme de temps de calcul à cause des temps d'écriture/lecture de fichiers. La méthode 3 est souvent la solution préférée pour ces genres de couplages car contrairement aux méthodes 1 et 2, les calculs se font sur plusieurs machines, ou *nœuds* de calcul. Chaque nœud est composé de plusieurs processeurs et/ou *cœurs* de calcul. Il est alors possible d'exécuter sur chaque processeur/cœur une ou plusieurs tâches, ce qui permet des échanges optimisés dans un environnement de système à mémoire distribuée et / ou partagée. L'environnement de programmation par échanges de messages / données le plus répandu est MPI (*Message Passing Interface*), la bibliothèque employée dans cette étude pour coupler les différents problèmes. Ce travail fait suite en partie au travail de Garaud [10]. Les couplages traités ici entre les différentes physiques seront qualifiés de couplage MPI, comme précisé à la Figure 2.

4 Algorithme de couplage

Comme proposé dans [3] puis étendu encore récemment par [1], le couplage entre les problèmes de mécanique des fluides (Stokes-Darcy), de mécanique des solides NL et la gestion des interfaces mobiles (par la méthode *Level-set*) est réalisé dans notre cas *via* un algorithme de couplage faible. L'algorithme séquentiel utilisé pour simuler les infusions est schématisé sur la Figure 3. Une initialisation des fonctions *Level-set* (représentant les interfaces Stokes-Darcy $\Gamma_{s/d}$ et le front de fluide Γ_f) ainsi que du *tvf* (taux volumique de fibres) des renforts permet de définir l'état initial du problème. Ensuite, la simulation de l'infusion est réalisée par la résolution séquentielle de chacun des problèmes de mécanique des solides NL, de mécanique des fluides et du problème *Level-set*.

A l'issue de la résolution de ces problèmes, l'état du système permet de définir si l'infusion est terminée ou non. Si l'infusion n'est pas terminée, alors les résultats des simulations sont mis à jour / partagés avec les problèmes associés. La Figure 4 représente schématiquement les échanges des variables

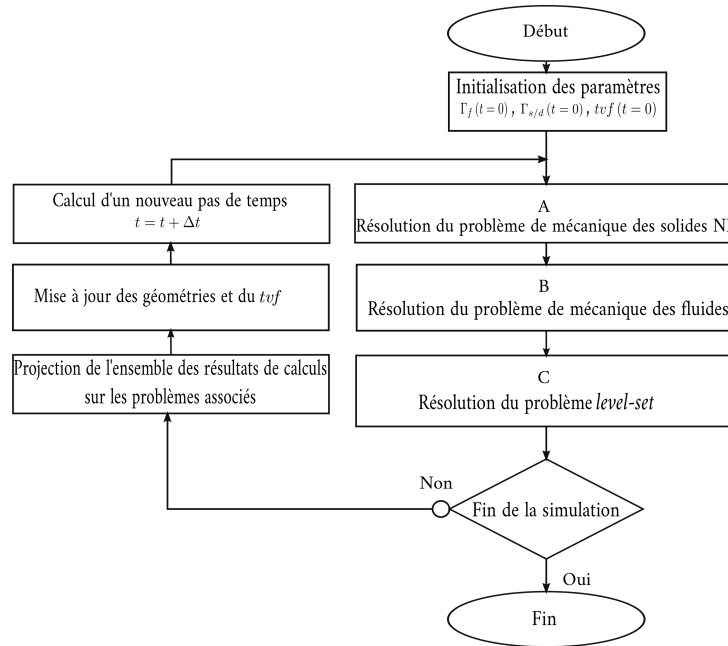


FIGURE 3 – Schéma de l’algorithme de couplage utilisé pour la simulation du procédé d’infusion [11]

entre les codes, à chaque pas de temps (Δt étant le pas de temps et t le temps), et la nature physique des variables envoyées (respectivement reçues par chaque code ou problème).

- le problème de mécanique des fluides (problème ①) envoie les champs de vitesse (\vec{v}^h) et de pression (p^h), et récupère le déplacement du domaine (\vec{u}^h);
- le problème de mécanique NL (problème ③) récupère la nouvelle position du front de fluide (ϕ^h) ainsi que la pression du fluide (p^h), pour actualiser les propriétés mécanique des préformes humides ($[C^{wet}] (\underline{\varepsilon}^h, p^h)$) et sèches ($[C^{dry}] (\underline{\varepsilon}^h)$); il envoie le déplacement (\vec{u}^h)
- le problème *Level-set* (problème ②) récupère la vitesse du fluide (\vec{v}^h) et actualise les interfaces.

A l’issue de ces transferts d’informations, le maillages est mis à jour pour prendre en compte l’état de déformation du système ainsi que la modification du *tvf* associé.

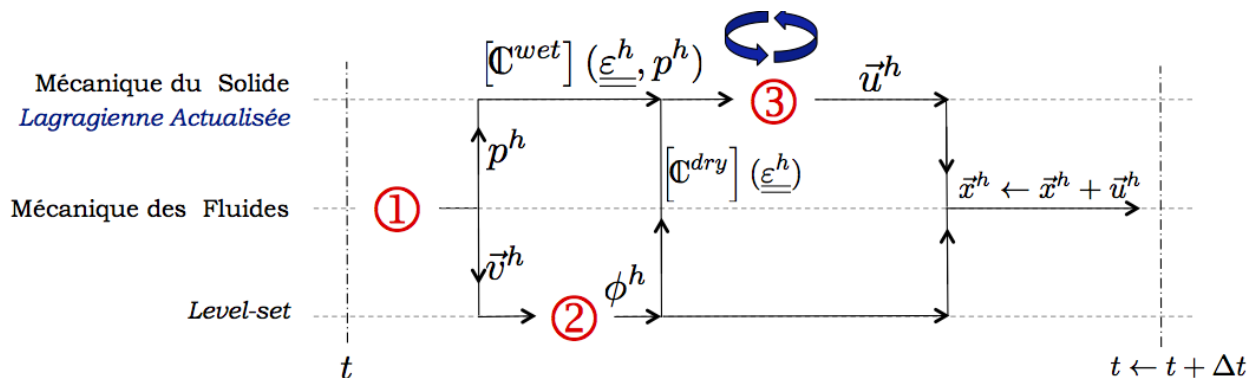


FIGURE 4 – Schéma illustratif montrant les échanges entre problèmes

5 Résultats

5.1 Géométrie et conditions aux limites

A titre d’illustration, le couplage entre les 3 problèmes est réalisé sur une géométrie en forme de « T », forme assez couramment rencontrée en ingénierie aéronautique (raidisseur). Pour le problème

Stokes-Darcy, le domaine de calcul est divisé en deux parties : un domaine purement fluide (écoulement de Stokes) et un domaine poreux (écoulement de Darcy) (Figure 5). Les dimensions de la pièce sont présentées sur la Figure 5. L'interface Stokes-Darcy ($\Gamma_{s/d}$) est représentée par l'iso surface zero colorée en rouge sur cette figure. Des conditions de symétrie ont été utilisées afin de réduire la taille du problème.

Les conditions aux limites associées à la stratégie d'infusion sont représentées sur la Figure 5. Pour le problème de mécanique des solides, des conditions en déplacement sont imposées sur le drainant et représentent le contact avec le moule ($\vec{U} = U_x \cdot \vec{x} + U_y \cdot \vec{y}$). Des conditions en contrainte normale sont imposées sur les autres frontières et modélisent l'effet de la pression atmosphérique sur la bache à vide. Pour le problème de mécanique des fluides, ces conditions consistent à imposer une pression à l'évent et à l'arrivée de résine, et des conditions de vitesse normale nulle sur l'ensemble des autres frontières du domaine (où \vec{v} est la vitesse et \vec{n} le vecteur normal à la frontière) représentant la bache à vide.

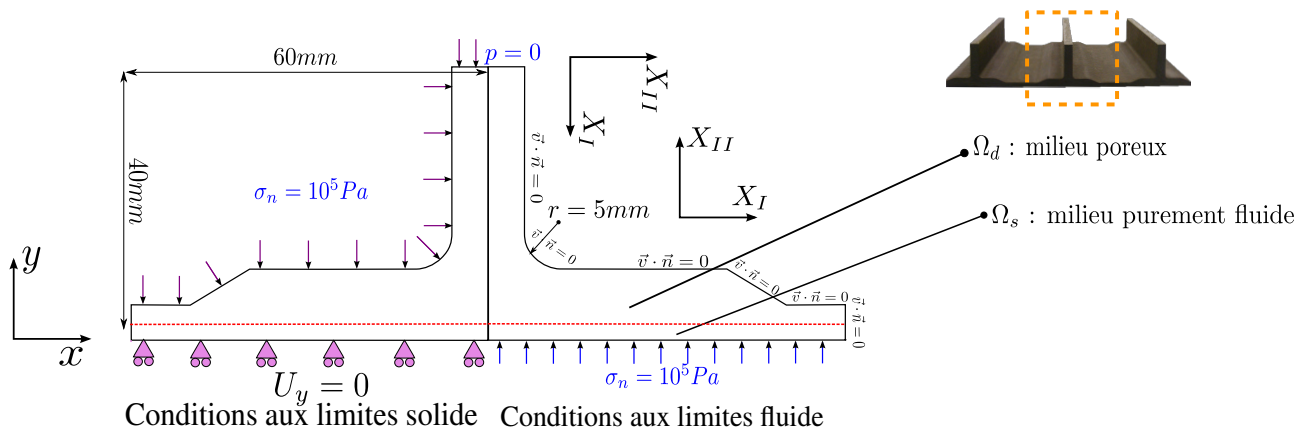


FIGURE 5 – Géométrie et conditions aux limites imposées pour le problème fluide et mécanique de l'infusion d'un raidisseur en T [1]

5.2 Simulation avec MPI

Le couplage des trois problèmes a été implémenté dans l'environnement du code éléments finis *Z-set*. A titre d'illustration, les calculs ont été réalisés sur une seule machine comprenant 3 cœurs, permettant de tirer partie, à une échelle courante, de la mémoire partagée d'un processeur multi-cœurs. Chaque code (*i.e.* problème) s'exécute donc sur un cœur différent. La librairie MPI a été utilisée afin d'assurer les échanges de données entre les différents codes, conformément au schéma présenté sur la Figure 4. Cinq maillages non structurés de raffinement croissant, constitués de triangles linéaires, ont été considérés pour ce problème (notés maillages 1, 2, 3, 4 et 5 dans le tableau 1). La taille du maillage (nombre de nœuds et d'éléments), ainsi que les paramètres pour les problèmes fluide (viscosité η , perméabilités orthotropes $\underline{\underline{K}} = K_I \vec{X}_I \otimes \vec{X}_I + K_{II} \vec{X}_{II} \otimes \vec{X}_{II}$) et mécanique (module d'Young E , coefficient de poisson ν) sont résumés dans les tableaux 1 et 2. On notera que le but de ce travail étant de comparer les performances des couplages, certains raffinements des physiques elles-mêmes ont été allégés par rapport aux possibilités à disposition qui sont détaillées dans des travaux complémentaires [1, 2, 3, 4, 11], ceci afin de réduire les temps de calcul : le comportement des préformes est supposé isotrope linéaire et le problème fluide ne considère que la résine seule mais des préformes de perméabilité orthotrope. Toutefois, les couplages restent bien présents : pression de fluide-comportement des renforts saturés, vitesse fluide/solide-propagation des interfaces, ...

Pour illustrer les phénomènes modélisés, la Figure 6-a présente le champ de pression dans la pièce et la Figure 6-b l'amplitude du champ de vitesse à l'instant $t = 4$ secondes, après la compaction de la préforme sous l'effet de la pression atmosphérique. Au cours de l'infusion, des déplacements mécaniques et des grandes déformations ont lieu dans la géométrie comme cela a été largement décrit dans des travaux précédents ([3, 1] par exemple). La Figure 7 présente les isovaleurs des amplitudes des déplacements des préformes : Figure 7-a superposée à la configuration initiale (en gris), et Figure 7-b avec le front de fluide mobile représenté par la ligne rose (Γ_f). La Figure 7-a montre que les déformations observées ne sont pas homogènes sur le domaine global. En effet, les dimensions dans la direction de compaction changent

TABLE 1 – Paramètres des différents maillages

Maillage	Nombre de nœuds	Nombre d'éléments
1	1106	2212
2	2060	4120
3	3063	6126
4	12104	23544
5	26726	52462

TABLE 2 – Paramètres pour les problèmes fluide et mécanique

$K_I (m^2)$	$K_{II} (m^2)$	$\eta (Pa.s)$	$E (MPa)$	ν
100.10^{-11}	10^{-11}	0,03	210	0,3

(de l'ordre de 10%) tandis que les dimensions selon la direction \vec{x} restent quasiment inchangées. Ceci est du à l'orthotropie de la perméabilité combinée au gradient de pression induit par les conditions aux limites : l'hétérogénéité des pressions conduit à un comportement des préformes humides hétérogène *via* la loi de Terzaghi considérée.

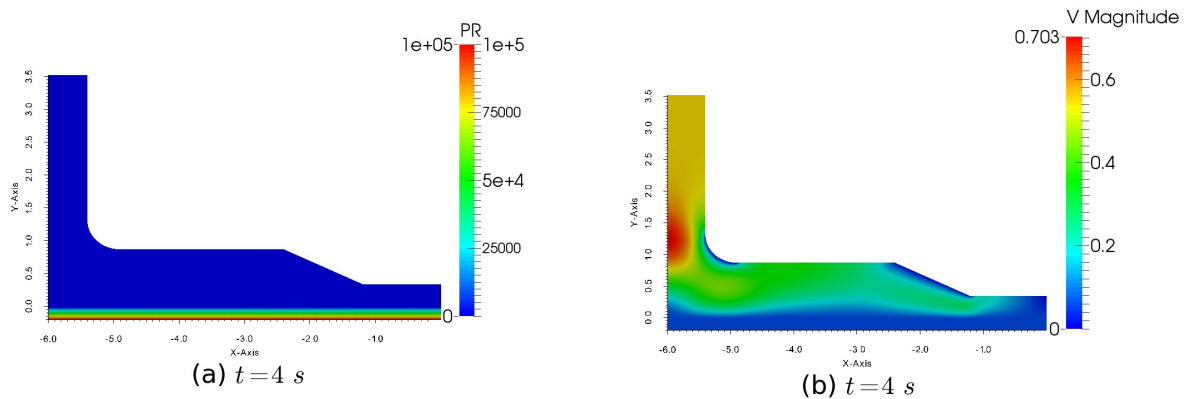
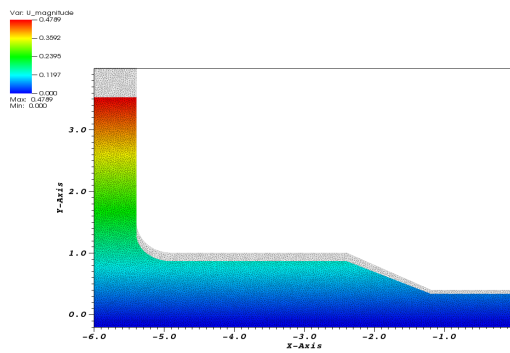
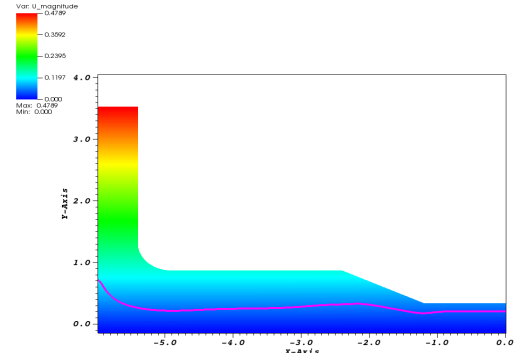


FIGURE 6 – Partie fluide : champs de pression et vitesse à $t = 4s$

Le but de ce travail est de se concentrer avant tout sur les temps de calcul. L'évolution du temps de calcul en fonction de la densité des maillages est comparée avec la méthode d'échange utilisée dans les travaux antérieurs de [1]. Ces temps sont reportés dans le Tableau 3 et représentés sur la Figure 8 où l'évolution des temps calcul en fonction du raffinement du maillage montre clairement que la technique de [1] présente des temps de calcul plus importants. En effet, contrairement à MPI cette méthode nécessite des échanges de données conséquents, et de plus ne permet pas de réaliser des tâches sur différents processeurs en tirant partie de la mémoire partagée/distribuée (i.e. avec MPI chaque code s'exécute sur un cœur spécifique). Particulièrement, on observe une réduction du temps de calcul par un facteur de 2 pour les maillages les plus raffinés (notamment pour le maillage 5). Les physiques étant résolues par les mêmes solveurs, l'augmentation du temps de calcul avec la taille du problème est donc directement liée à la fois à la croissance du nombre de degrés de libertés, mais aussi aux échanges de données plus volumineux. Une étude plus poussée sur les temps de chargement, de communication, ... est en cours.



(a) $t = 1 s$



(b) $t = 4 s$

FIGURE 7 – Patrie solide : (a) isovaleurs de l’amplitude du déplacement sur la configuration déformée comparée au maillage initial à $t = 1s$ et (b) isovaleurs de l’amplitude du déplacement et évolution du front de fluide mobile à $t = 4s$

TABLE 3 – Valeurs numériques du temps de calcul (abrégé par tdc , pour les deux méthodes d’échanges : MPI et méthode de [1])

Maillage	Nombre de nœuds	tdc (MPI)	tdc (méthode de [1])	Réduction du tdc
1	1106	74	104	29%
2	2060	148	245	40%
3	3063	254	442	43%
4	12104	5300	7006	24%
5	26726	23000	41240	44%

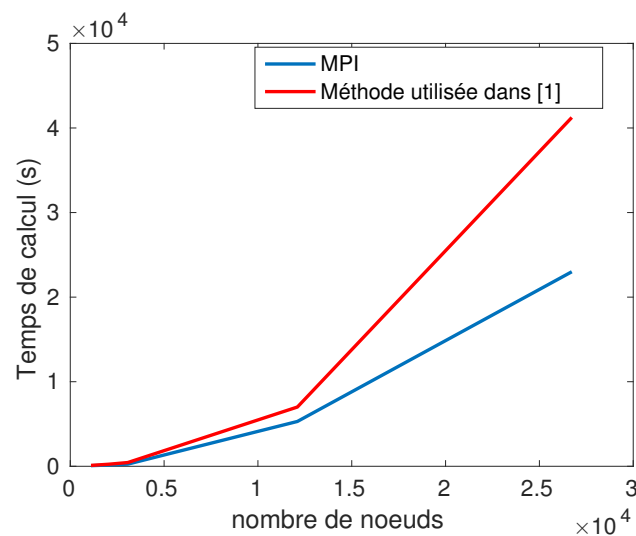


FIGURE 8 – Evolution du temps de calcul pour les deux méthodes d’échanges : MPI et méthode de [1]

6 Conclusion

Partant de précédents travaux réalisés par [1, 3, 4], une approche robuste a été proposée dans ce travail afin de coupler des problèmes transitoires de mécanique des fluides Stokes-Darcy, de mécanique des solides non linéaire, et le problème *Level-set*. MPI a été utilisé afin d'assurer les échanges de données entre les différents codes distants. Le couplage a été illustré sur une pièce industrielle complexe étudiée dans des travaux précédents. Le temps de calcul a été optimisé avec MPI en comparaison avec une autre technique plus conventionnelle. Les prochains travaux vont se concentrer d'une part sur l'intégration de problèmes additionnels au couplage déjà réalisé, tels que l'influence de la température ou de la rhéologie. D'autre part, des calculs parallèles doivent être envisagés pour des réductions de temps de calcul plus conséquentes de chaque sous-problème. Les méthodes de décompositions de domaines sont ainsi envisagées pour chacune des différentes physiques considérées, tirant partie de l'architecture *multi-thread* des processeurs actuels, associées au couplage *via* MPI qui a démontré ici son efficacité pour la gestion par passage de messages. Ce travail est actuellement en cours de réalisation.

Références

- [1] M. Blais, N. Moulin, P. J. Liotier, S. Drapier, *Resin infusion-based processes simulation : coupled Stokes-Darcy flows in orthotropic preforms undergoing finite strain*, Int. J. Mater. Form., 1–12, 2015.
- [2] L. Abou Orm, R. Troian, S. Drapier, J. Bruchon, N. Moulin, *Stokes–Darcy coupling in severe regimes using multiscale stabilisation for mixed finite elements : monolithic approach versus decoupled approach*, European Journal of Computational Mechanics, Taylor and Francis, 113-137, 2014.
- [3] P. Celle, S. Drapier, J. M. Bergheau, *Numerical modelling of liquid infusion into fibrous media undergoing compaction*, European Journal of Mechanics-A/Solids, Elsevier, 647-661, 2008.
- [4] G. Pacquaut, J. Bruchon, N. Moulin, S. Drapier, *Combining a level-set method and a mixed stabilized P1/P1 formulation for coupling Stokes–Darcy flows*, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Wiley Online Library, 459-480, 2012.
- [5] K. Terzaghi, *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley and Sons, 1996.
- [6] C. Farhat, C.A. Felippa, K. C. Park, *Partitioned analysis of coupled mechanical systems*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3247-3270, 2001.
- [7] A. Dereims, S. Drapier, J. M. Bergheau, P. de Luca, *3D robust iterative coupling of Stokes, Darcy and solid mechanics for low permeability media undergoing finite strains*, Finite Elements in Analysis and Design, Elsevier, 1-15, 2015.
- [8] K. C. Park, C.A. Felippa, *Partitioned analysis of coupled systems*, Computational methods for transient analysis, T. Belytschko and H. T. J. R., eds., North-Holland Pub. Co., 157-219, 1983.
- [9] K. C. Park, C.A. Felippa, J. A. Deruntz, *Stabilization of staggered solution procedures for fluid-structure interaction analysis*, Computational methods for fluid-structure interaction problems, T. Belytschko and T. Geers, American society of mechanical engineers, 95-124, 1977.
- [10] J. D. Garaud, *Développement de méthodes de couplage aéro-thermo-mécanique pour la prédiction d'instabilités dans les structures aérospatiales chaudes*, PhD Thesis, UPMC, 2008.
- [11] M. Blais, *Modélisation et suivi du procédé par infusion de résine sur une nouvelle génération de renforts structuraux pour l'aéronautique*, PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2016.