

Modélisation et simulation avancées de l'écoulement dans les réservoirs souterrains avec fractures et puits pour une industrie durable

Accès libre

Problème	Oil Gas Sci. Technol. - Rév. IFP Energies nouvelles Volume 75, 2020 Modélisation et simulation avancées de l'écoulement dans les réservoirs souterrains avec fractures et puits pour une industrie durable
Numéro de l'article	41
Nombre de pages)	13
EST CE QUE JE	https://doi.org/10.2516/ogst/2020037
Publié en ligne	18 juin 2020

- Haut
- Abstrait
- 1. Introduction
- 2 Modèles mathématiques
- 3 Implémentation numérique ...
- 4 Exemples numériques ...
- 5. Conclusion
- Remerciements
- Les références
- Liste des tableaux
- Liste des figures

 Science et technologie du pétrole et du gaz - Rév. IFP Energies nouvelles **75** , 41 (2020)

Article régulier

Une étude comparative sur la simulation de la déformation de fracture induite par l'écoulement dans les milieux souterrains au moyen de FEM et FVM étendus

 Tingyu Li ¹ , Dongxu Han ² , Fusheng Yang ^{1*} , Bo Yu ^{2*} , Dongliang Sun ² et Jinjia Wei ¹
¹ École de génie chimique et de technologie, Université Xi'an Jiaotong, 710049 Xi'an, RP Chine

² École de génie mécanique, Laboratoire clé de Beijing de technologie et d'équipement critiques pour les pipelines pour le développement du pétrole et du gaz en eau profonde, Institut de technologie pétrochimique de Beijing, 102617 Pékin, République populaire de Chine

 * Auteurs correspondants: yang.fs@xjtu.edu.cn ; yubobox@vip.163.com

Reçu: 25 janvier 2020

Accepté: 15 mai 2020

Abstrait

Une simulation précise et efficace de l'écoulement et de la déformation des fluides dans les milieux poreux revêt une importance croissante dans un large éventail de domaines de l'ingénierie. À l'heure actuelle, seules plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour simuler la déformation des milieux poreux fracturés. Il est très important de connaître leurs domaines d'application, leurs avantages et leurs inconvénients pour résoudre correctement les problèmes pratiques. Par conséquent, dans cet article, nous avons comparé deux méthodes de simulation numérique pour la déformation par fracture induite par l'écoulement dans les milieux poreux. La première est la méthode des éléments finis étendus (XFEM), qui est basée sur la méthode des éléments finis classique et peut simuler des problèmes discontinus forts ou faibles. L'autre est développé dans le cadre des volumes finis, appelée méthode étendue des volumes finis (XFVM). Nous avons conçu trois cas de test, dont une seule fracture, fractures croisées et huit fractures discrètes, pour étudier la précision et l'efficacité de XFEM et XFVM. Les solutions de référence ont été fournies par le logiciel commercial, COMSOL, où la méthode standard des éléments finis est implémentée. Les résultats de la recherche ont montré que la précision de XFEM était légèrement supérieure à celle de XFVM, mais que ce dernier était plus efficace. Ces résultats sont susceptibles d'être utiles dans la prise de décision concernant le choix des méthodes de résolution du problème de couplage multi-champ dans les milieux poreux fracturés.

© T.Li et al., Publié par IFP Energies nouvelles, 2020



Il s'agit d'un article en libre accès distribué sous les termes de la licence d'attribution Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui permet une utilisation, une distribution et une reproduction sans restriction sur tout support, à condition que l'œuvre originale soit correctement citée.

1. Introduction

Page d'accueil

Table des matières

◀ Article précédent Article suivant ▶

ARTICLE

- Abstrait
- **HTML complet**
- PDF (1,945 Mo)
- ePUB (4,668 Mo)
- Les références

MÉTRIQUE

Afficher les statistiques de l'article

PRESTATIONS DE SERVICE

Mêmes auteurs

- Google Scholar
- Base de données EDP Sciences

Recommander cet article

Envoyer sur mon Kindle

Télécharger la citation

Alertez-moi si cet article est corrigé

Alertez-moi si cet article est cité

ARTICLES LIÉS

Méthode de raffinement adaptatif du maillage et de moment géométrique d'ordre élevé pour la simulation de sprays d'évaporation polydispersés

Science et technologie du pétrole et du gaz - Rév. IFP Energies nouvelles (2016) 71, 61

Optimisation de la rigidité des structures géométriquement non linéaires et de la solution basée sur le level set

Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim. 2016, 7, A3

Réduction du besoin de calcul de l'analyse de stabilité du fraisage par moyennage partiel

Fabrication Rev.2014, 1, 14

Plus

BOOKMARKING



Services aux lecteurs

Alerte email

La simulation précise et efficace de l'écoulement couplé et de la géomécanique (également appelée hydro-mécanique couplée [HM]) joue un rôle essentiel dans l'étude de divers problèmes géophysiques et d'ingénierie, tels que l'exploitation des réservoirs d'hydrocarbures, la séquestration du CO₂ et l'extraction géothermique, etc. [1 - 4]. Une étude théorique et numérique approfondie a été menée pour les problèmes d'écoulement couplé et mécaniques au cours des dernières décennies. Terzaghi a d'abord proposé le processus couplé d'écoulement et de mécanique dans les milieux géologiques comme phénomène de consolidation [5]. Par la suite, basée sur la théorie linéaire-élastique et la loi de Darcy, la théorie de la consolidation tridimensionnelle (3D) a été établie par Biot [6]. Une des premières solutions pour la théorie de la consolidation 3D a été présentée et la réponse de pression interstitielle non monotone a été démontrée par Mandel [7]. Pour certains cas particuliers, la méthode analytique est simple et efficace [5 - 7]. Cependant, pour des problèmes complexes, la simulation numérique est souvent utilisée [1 - 4, 8 - 11].

En termes de simulation numérique, il existe deux familles différentes d'approches pour la discrétisation et la résolution des équations gouvernantes, qui sont la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode des volumes finis (FVM). La FEM est principalement appliquée pour résoudre les problèmes de déformation mécanique solide [8, 9]. Le FVM est principalement utilisé pour résoudre les problèmes d'écoulement et de transfert de chaleur [10, 11]. Par conséquent, la méthode des solutions mixtes (FVM + FEM) est généralement utilisée pour résoudre les problèmes de couplage fluide et mécanique dans les milieux poreux souterrains [12]. Désormais, le FVM s'est étendu au domaine de la mécanique des solides et a connu un grand succès [13 - 16]. Suliman *et coll.* [17] a proposé un FVM amélioré dans le but de modéliser des structures élastiques linéaires en flexion. Par rapport au FEM traditionnel, l'avantage du modèle a été vérifié et une analyse d'erreur rigoureuse a été menée. Asadi *et coll.* [13] ont résolu un modèle de consolidation de Biot à coefficients discontinus par FVM. Les résultats ont démontré que le schéma de volumes finis a conduit à une méthode locale de conservation de la masse, qui peut supprimer les oscillations de pression et a donné une plus grande précision pour les paramètres d'écoulement et de mécanique. Nordbotten [14] a proposé une FVM centrée sur les cellules pour discrétiser l'écoulement couplé et la déformation des milieux poreux. L'approche présentée a été validée par comparaison avec des solutions analytiques. Sur la base de la théorie de la consolidation de Biot et de la relation constitutive de Mohr - Coulomb, Tang *et al.* [15] a présenté un nouveau code FVM pour le modèle de sol poro-élasto-plasticité. Les résultats ont montré que le solveur mis en œuvre était capable et efficace de prédire des réponses raisonnables du sol avec un couplage de pression interstitielle dans différentes conditions aux limites.

Outre la déformation de la masse rocheuse, l'une des difficultés qui ne peut être ignorée dans la simulation du couplage mécanique des fluides en milieu poreux est le système de fracture. En général, la perméabilité et la porosité des milieux poreux souterrains sont très faibles, et il est difficile pour le fluide de passer à travers sans fracturation hydraulique ou stimulation chimique. Par conséquent, la caractérisation et la simulation du système de fracture est également un enjeu clé pour une meilleure compréhension de l'écoulement et du comportement mécanique dans les milieux poreux déformables. En fait, le FEM traditionnel peut gérer l'écoulement et la déformation des milieux poreux fracturés. Cependant, cela introduira un grand nombre de grilles non structurées. Pour éviter la génération des grilles complexes, la méthode des éléments finis étendus (XFEM) est proposée, [18 - 21]. Yan *et coll.* [20] ont développé un schéma XFEM stabilisé pour traiter l'oscillation de déplacement le long des frontières de macro-fracture. La discrétisation de l'espace mixte et les méthodes implicites séquentielles à contraintes fixes modifiées ont été utilisées pour résoudre le modèle de couplage. Le modèle et les résultats ont été vérifiés par comparaison avec COMSOL. Shi *et coll.* [21] ont proposé une méthode basée sur XFEM pour modéliser la propagation des fractures hydrauliques. Pour gagner du temps CPU pour résoudre des systèmes d'équations linéaires à grande échelle, une technique de réduction a été adoptée dans un modèle étroitement couplé.

Outre FEM et XFEM, de nombreux efforts ont été consacrés à la mise en place d'une méthode de simulation basée sur les volumes finis pour la déformation par fracture [22 - 26]. Basé sur l'approche des volumes finis centrés sur les cellules, Ucar *et al.* [22] ont proposé une méthode d'approximation de contraintes multipoints pour discrétiser l'écoulement couplé et la déformation mécanique dans les milieux poreux fracturés. La convergence de la méthode a été examinée pour plusieurs problèmes de référence. Récemment, Deb *et al.* [23 - 26] ont présenté une méthode étendue des volumes finis (XFVM) pour la modélisation de la rupture par cisaillement dans les réservoirs fracturés. Similaire au XFEM, les fonctions d'enrichissement ont été introduites pour simuler la discontinuité de déplacement des surfaces de fracture.

D'après l'examen ci-dessus, selon le type de grille et l'algorithme, nous pouvons constater qu'il existe trois méthodes principales pour résoudre le problème du fluide couplé et de la géomécanique. Le premier est que, sur la base des grilles non structurées, les équations d'écoulement et mécaniques sont résolues ensemble par FEM standard ou FVM. La seconde est la technologie de résolution mixte, qui consiste à résoudre les équations d'écoulement par le FVM et les équations mécaniques à résoudre par le XFEM. En faisant cela, le domaine de calcul peut être discrétisé par des grilles de structure. Le dernier est le champ d'écoulement est toujours obtenu par le FVM, et le champ de déformation est calculé par le XFVM. L'avantage de cette méthode est que nous pouvons toujours utiliser la technologie de génération de réseau structuré.

Bien qu'un grand nombre de modèles et d'algorithmes aient été proposés pour la simulation de processus de couplage fluide et mécanique, il n'y a pas de comparaison quantitative entre eux. Il est très important pour la recherche scientifique de connaître les avantages et les inconvénients de chaque algorithme et modèle. Par conséquent, dans cet article, nous étudierons les performances de XFEM et XFVM sur la simulation de la déformation par fracture induite par l'écoulement dans les milieux poreux. Pour éviter l'influence du champ fluide sur ces deux méthodes, les équations d'écoulement sont discrétisées et résolues par le FVM standard. Ensuite, la pression du fluide est fournie pour calculer la déformation mécanique.

Le contour de ce document est la suivante. Les modèles mathématiques comprenant l'équation d'écoulement et l'équation d'équilibre mécanique sont présentés dans la section 2. L'implémentation numérique et la discrétisation de ces équations par FVM traditionnel et FEM et FVM étendus sont données dans la section 3. Les comparaisons numériques pour trois cas de test et l'estimation des erreurs sont présentées dans la section 4. Enfin, les conclusions et remarques sont données dans la section 5.

2 Modèles mathématiques

2.1 Equations de flux

Par souci de simplicité, nous considérons uniquement le problème d'écoulement monophasé dans les milieux poreux fracturés. Combinée à la loi de Darcy, l'équation du bilan massique peut être obtenue comme suit:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\rho \frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot (\nabla p - \rho g \nabla z) \right] = \rho q, \quad (1)$$

où t est le temps; ρ est la densité du fluide; ϕ est la porosité; \mathbf{K} est le tenseur de perméabilité; μ est la viscosité du fluide; p est la pression du fluide; g est l'accélération gravitationnelle; z est la distance verticale; q est le terme source.

Compte tenu de la légère compressibilité de la roche et du fluide, le premier terme de LHS dans l'équation (1) doit être davantage déduit:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \rho \frac{\partial\phi}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \frac{\partial\rho}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} = \rho\phi \left[\frac{1}{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial p} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial p} \right] \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (2)$$

Présentation des coefficients compressibles de roche et de fluide, $c_r = \frac{1}{\phi} \frac{\partial\phi}{\partial p}$, $c_f = \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial p}$, l'équation (2) se lit comme suit:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \rho\phi(c_r + c_f) \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (3)$$

En supposant de petites variations spatiales pour la densité, c'est-à-dire $\nabla \cdot \rho = 0$, par conséquent, l'expression finale de l'équation (1) peut être obtenue:

$$\phi(c_r + c_f) \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot (\nabla p - \rho g \nabla z) \right] = q. \quad (4)$$

Afin de prendre en compte l'influence des fractures sur l'écoulement du fluide, le modèle de fracture discrète embarquée (EDFM) est adopté [27, 28]. Selon le processus de mise en œuvre d'EDFM, le milieu fracturé peut être distinctement séparé en un système de fracture et une matrice endommagée [29]. Par conséquent, la fracture et la matrice sont indépendantes du point de vue du calcul, sauf pour la fonction de transfert. De plus, ce modèle ignore le changement de gradient de pression de fracture dans la direction normale, ce qui permet une représentation dimensionnelle inférieure du système de fracture [30].

Sur la base de l'EDFM, l'équation d'écoulement exprimée par l'équation (4) peut être séparée en deux parties:

Matrice:

$$\phi^m(c_r + c_f) \frac{\partial p^m}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{K}^m}{\mu} \cdot (\nabla p^m - \rho g \nabla z) \right] + \psi^{fr-m} = q^m. \quad (5)$$

Fracture:

$$\phi^{fr}(c_r + c_f) \frac{\partial p^{fr}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{K}^{fr}}{\mu} \cdot (\nabla p^{fr} - \rho g \nabla z) \right] + \psi^{m-fr} = q^{fr}, \quad (6)$$

où les exposants m et fr représentent respectivement la matrice et le milieu de fracture; ψ^{fr-m} et ψ^{m-fr} sont les fonctions de transfert [31].

2.2 Équations mécaniques

L'équilibre de l'impulsion linéaire dans la matrice poreuse est donné par:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_t + \mathbf{b} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

où $\boldsymbol{\sigma}_t$ est la contrainte totale; \mathbf{b} est le vecteur de force corporelle.

Notez que nous utilisons la convention selon laquelle la contrainte de traction est positive. La relation entre la contrainte effective et la pression interstitielle est donnée par:

$$\boldsymbol{\sigma}_t = \boldsymbol{\sigma} - \alpha p^m \mathbf{I}, \quad (8)$$

où $\boldsymbol{\sigma}_t$ est la contrainte totale; $\boldsymbol{\sigma}$ est le stress effectif; \mathbf{I} est le même tenseur; α est le coefficient de Biot.

La relation entre le stress et la tache est définie comme:

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda \varepsilon_v \mathbf{I} + 2G \varepsilon(\mathbf{u}), \quad (9)$$

où ε_v est la déformation volumétrique; λ et G sont les coefficients de Lamé.

La relation entre la tache et le déplacement est donnée par:

$$\varepsilon_v = \nabla \cdot \mathbf{u}, \quad (\text{dix})$$

$$\varepsilon(\mathbf{u}) = 0.5(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad (11)$$

où \mathbf{u} le vecteur de déplacement, $\mathbf{u}^T = \{u_x, u_y\}$.

Selon la formule de contrainte de Cauchy, les contraintes de traction et de cisaillement sur la surface de fracture sont données comme suit:

$$\boldsymbol{\sigma}_{fr} = -(\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}), \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{fr} = (I - \mathbf{nn}) \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}, \quad (13)$$

où \mathbf{n} représente le vecteur normal à la surface de fracture.

3 Implémentation numérique et discrétisation de base

Pour les équations d'écoulement, la méthode classique des volumes finis centrée sur les cellules (FVM) est utilisée. Le schéma d'approximation de flux en deux points (TPFA) pour le terme de gradient de pression est adopté. Le schéma implicite d'approximation du temps est utilisé. Pour les équations mécaniques, nous avons utilisé deux algorithmes de résolution, qui sont XFEM et XFVM.

3.1 Discrétisation des équations d'écoulement

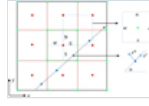
Considérez le domaine bidimensionnel (2D) illustré à la figure 1. Nous avons l'approximation suivante pour les équations d'écoulement:

$$\begin{aligned} \phi^m (c_r + c_f) \frac{p_i^m - \bar{p}_i^m}{\Delta t} \Delta_i - \sum_j T_{ij}^m (p_i^m - p_j^m) \\ + T_{il}^{fr-m} (p_i^m - p_l^{fr}) = q^m \Delta_i, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \phi^{fr} (c_r + c_f) \frac{p_i^{fr} - \bar{p}_i^{fr}}{\Delta t} \Delta_i - \sum_k T_{ij}^{fr} (p_i^{fr} - p_k^{fr}) \\ + T_{il}^{fr-m} (p_i^m - p_l^{fr}) = q^{fr} \Delta_i, \end{aligned} \quad (15)$$

où Δ_i et Δ_l représentent le volume de contrôle de la matrice et du segment de fracture, respectivement; T_{ij}^m , T_{il}^{fr-m} , T_{ij}^{fr} , Et T_{il}^{fr-m} représente la transmissivité matrice-matrice, la matrice-fissure, et la fracture de la fracture. \bar{p}_i^m et \bar{p}_i^{fr} représentent la matrice et la pression de fracture calculées au dernier pas de temps.

Fig. 1



Le schéma du modèle intégré de fracture discrète (EDFM). Les points rouges représentent les grilles matricielles, dont la pression du fluide de stockage; les points bleus désignent les grilles de fracture, qui stockent la pression de fracture et le déplacement pour le XFVM; les points vert clair stockent le déplacement de la matrice pour le XFVM et le XFEM; e, w, n, s représentent l'interface du volume de contrôle; E, W, N, S représentent l'interface interne dans un volume de contrôle.

Évidemment, les équations (14) et (15) doivent être résolues par couplage. Nous pouvons encore remodeler ces deux équations sous une forme matricielle [32]:

$$\begin{bmatrix} A^{mm} & A^{mf} & A^{mw} \\ A^{fm} & A^{ff} & A^{fw} \\ A^{wm} & A^{wf} & A^{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^m \\ p^{fr} \\ p^w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q^m \\ q^{fr} \\ q^w \end{bmatrix}, \quad (16)$$

où en exposant w représente les termes de puits externes, qui peuvent être implémentés par la formule Peaceman [33]. Si aucun puits n'est foré dans la matrice et le domaine de fracture, les termes « w » seront nuls.

3.2 Discrétisation des équations mécaniques

3.2.1 Méthode des éléments finis étendus (XFEM)

Pour dériver la formulation XFEM pour un corps d'équilibre avec une forte discontinuité, considérons un domaine 2D Ω avec une fracture interne indiquée par Γ_c illustré à la figure 2. Les conditions aux limites essentielles sont définies comme suit:

1. La condition aux limites de Dirichlet est définie comme $\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}}_D$ on Γ_D , où $\bar{\mathbf{u}}_D$ est le déplacement prescrit sur la frontière Γ_D .
2. Les conditions aux limites de Neumann sont définies comme suit: $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_l = \bar{t}_l$ on Γ_l , où \bar{t}_l est la contrainte prescrite sur la limite Γ_l , et $\Gamma_l \cap \Gamma_c = \emptyset$. Pour la frontière libre, nous avons $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_l = \mathbf{0}$. De plus, la condition aux limites internes est définie comme $\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_c = \mathbf{p}_c$.

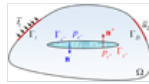


Fig. 2

Un corps élastique bidimensionnel avec une fracture interne.

Par conséquent, la forme faible de l'équation d'équilibre (7) peut être obtenue en multipliant par les fonctions de test $\delta \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ et en intégrant sur le domaine Ω comme:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} : \varepsilon(\delta \mathbf{u}) d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{b} \cdot \delta \mathbf{u} d\Omega - \int_{\Gamma_l} \bar{t}_l \cdot \delta \mathbf{u} d\Gamma + \int_{\Gamma_c} \mathbf{p}_c \\ \cdot \delta \mathbf{w} d\Gamma, \end{aligned} \quad (17)$$

où variation d'ouverture de fracture $\delta \mathbf{w} = \delta \mathbf{u}^+ - \delta \mathbf{u}^-$.

Pour XFEM, pour discrétiser l'équation intégrale (17), nous devons ajouter des fonctions d'enrichissement spéciales aux fonctions de forme par éléments finis classiques. En fonction du type de discontinuité et de la localisation des fractures, les fonctions d'enrichissement les plus couramment utilisées pour la forte discontinuité sont la fonction d'étape Heaviside $H(\mathbf{x})$, la fonction de branche de pointe $\varphi_x(\mathbf{x})$ et la fonction de jonction $J_m(\mathbf{x})$ [19 - 21]. Par conséquent, le champ de déplacement enrichi peut être défini comme

$$\begin{aligned}
\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = & \underbrace{\sum_{i \in \mathbf{I}} N_i(\mathbf{x}) \mathbf{u}}_{\text{Standard}} + \underbrace{\sum_{j \in \mathbf{J}} N_j(\mathbf{x}) [H(\mathbf{x}) - H(\mathbf{x}_j)] \mathbf{a}_j}_{\text{Heaviside}} \\
& + \underbrace{\sum_{k \in \mathbf{O}} N_k(\mathbf{x}) \sum_{z=1}^4 [\varphi_z(\mathbf{x}) - \varphi_z(\mathbf{x}_k)] \mathbf{b}_{zk}}_{\text{Branch}} \\
& + \underbrace{\sum_{m \in \mathbf{M}} N_m(\mathbf{x}) [J_m(\mathbf{x}) - J_m(\mathbf{x}_m)] \mathbf{c}_m}_{\text{Junction}},
\end{aligned} \tag{18}$$

où \mathbf{a}_j , \mathbf{b}_{zk} , \mathbf{c}_m sont les variables d'enrichissement du noeud.

En substituant l'approximation XFEM (Eq. (18)) dans la forme faible de l'équation d'équilibre (17), le système discret peut être finalement obtenu :

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R}, \tag{19}$$

où \mathbf{K} représente la matrice de rigidité globale, qui est assemblée par la rigidité de l'élément \mathbf{K}_{ij}^e :

$$\mathbf{K}_{ij}^e = \begin{bmatrix} k_{ij}^{uu} & k_{ij}^{ua} & k_{ij}^{ub} & k_{ij}^{uc} \\ k_{ij}^{au} & k_{ij}^{aa} & k_{ij}^{ab} & k_{ij}^{ac} \\ k_{ij}^{bu} & k_{ij}^{ba} & k_{ij}^{bb} & k_{ij}^{bc} \\ k_{ij}^{cu} & k_{ij}^{ca} & k_{ij}^{cb} & k_{ij}^{cc} \end{bmatrix}, \quad k_{ij}^{rs} = \int_{\Omega^e} (\mathbf{B}_i^r)^T \mathbf{D} \mathbf{B}_j^s d\Omega. \tag{20}$$

La matrice de déformation \mathbf{B} est définie comme suit:

$$\mathbf{B}_i^u = \begin{bmatrix} N_{i,x} & 0 \\ 0 & N_{i,y} \\ N_{i,y} & N_{i,x} \end{bmatrix} \quad (i \in \mathbf{I}), \tag{20a}$$

$$\mathbf{B}_j^a = \begin{bmatrix} (N_j H)_x & 0 \\ 0 & (N_j H)_y \\ (N_j H)_y & (N_j H)_x \end{bmatrix} \quad (j \in \mathbf{J}), \tag{20b}$$

$$\mathbf{B}_k^b = \begin{bmatrix} (N_k \varphi)_x & 0 \\ 0 & (N_k \varphi)_y \\ (N_k \varphi)_y & (N_k \varphi)_x \end{bmatrix} \quad (k \in \mathbf{O}), \tag{20c}$$

$$\mathbf{B}_m^c = \begin{bmatrix} (N_m J)_x & 0 \\ 0 & (N_m J)_y \\ (N_m J)_y & (N_m J)_x \end{bmatrix} \quad (m \in \mathbf{M}). \tag{20j}$$

Dans l'équation (19), \mathbf{R} est le vecteur de force externe global, qui est assemblé par le vecteur de force d'élément \mathbf{R}_{ij}^e :

$$\mathbf{R}_i^e = \{\mathbf{r}_i^u, \mathbf{r}_i^a, \mathbf{r}_i^b, \mathbf{r}_i^c\}. \tag{21}$$

Le vecteur force du noeud peut être défini comme suit:

$$\mathbf{r}_i^u = \int_{\Gamma_t} N_i \bar{t}_i d\Gamma_t + \int_{\Omega^e} (\mathbf{B}_i^u)^T (a p \mathbf{I}) d\Omega^e, \tag{21a}$$

$$\mathbf{F}_i^b = \int_{\Gamma_c} 2N_i \sqrt{r} \mathbf{p}_c d\Gamma_c, \tag{21b}$$

$$\mathbf{F}_i^a = \int_{\Gamma_c} 2N_i \mathbf{p}_c d\Gamma_c, \tag{21c}$$

$$\mathbf{F}_i^c = \int_{\Gamma_c} N_i (J - J_i) \mathbf{p}_c d\Gamma_c. \tag{21d}$$

3.2.2 Méthode des volumes finis étendus (XFVM)

Semblable au XFEM, le champ de déplacement d'élément du XFVM est défini comme [26]:

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \sum_{i \in \mathbf{I}} N_i(\mathbf{x}) \mathbf{u} + \sum_{j \in \mathbf{J}} \left\{ \sum_{k \in \mathbf{M}} N_k(\mathbf{x}) [\mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{H}(\mathbf{x}_k)] (\mathbf{s}_j^n + \mathbf{s}_j^t) \right\}, \quad (22)$$

où \mathbf{s}_j^n et \mathbf{s}_j^t représente le vecteur de déplacement normal et de cisaillement sur la surface de la fracture.

Comme le montre la figure 1 , l'intégration de l'équation (7) sur le domaine Ω peut être donnée par

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_t dV + \int_{\Omega} \mathbf{b} dV = 0. \quad (23)$$

En utilisant le théorème de divergence, l'équation (23) peut être convertie en intégration sur la frontière Γ :

$$\int_{\Gamma} \boldsymbol{\sigma}_t \cdot \mathbf{n}_{\Gamma} d\Gamma + \int_{\Omega} \mathbf{b} dV = 0. \quad (24)$$

Pour plus de commodité, l'équation (24) peut être ensuite convertie sous la forme de composantes de contrainte dans les directions x et y :

$$\int_{\partial\Omega} (\sigma_{xx}|_e - \sigma_{xx}|_w) dy + \int_{\partial\Omega} (\sigma_{xy}|_n - \sigma_{xy}|_s) dx = 0, \quad (25a)$$

$$\int_{\partial\Omega} (\sigma_{xy}|_e - \sigma_{xy}|_w) dy + \int_{\partial\Omega} (\sigma_{yy}|_n - \sigma_{yy}|_s) dx = 0. \quad (25b)$$

En combinant les équations (9) - (11) , nous pouvons obtenir les équations d'équilibre des forces sous forme de déplacement:

$$\begin{aligned} & (\lambda + 2G) \int_{\partial\Omega} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_e - \frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_w \right) dy \\ & + \lambda \int_{\partial\Omega} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \Big|_e - \frac{\partial u_y}{\partial y} \Big|_w \right) dy \\ & + G \int_{\partial\Omega} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \Big|_n - \frac{\partial u_x}{\partial y} \Big|_s \right) dx \\ & + G \int_{\partial\Omega} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \Big|_n - \frac{\partial u_y}{\partial x} \Big|_s \right) dx \\ & + \int_{\Omega} b_x dV - \alpha p^m \Delta y = 0, \end{aligned} \quad (26a)$$

$$\begin{aligned} & (\lambda + 2G) \int_{\partial\Omega} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \Big|_n - \frac{\partial u_y}{\partial y} \Big|_s \right) dx \\ & + \lambda \int_{\partial\Omega} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_n - \frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_s \right) dx + G \\ & \times \int_{\partial\Omega} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \Big|_e - \frac{\partial u_x}{\partial y} \Big|_w \right) dy + G \\ & \times \int_{\partial\Omega} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \Big|_e - \frac{\partial u_y}{\partial x} \Big|_w \right) dy \\ & + \int_{\Omega} b_y dV - \alpha p^m \Delta x = 0. \end{aligned} \quad (26b)$$

L'idée clé de XFVM est de savoir comment calculer la dérivée intégrale du déplacement dans les équations (26a) et (26b) . L'intégration de toute fonction F le long de l'interface interne $k \in \{E, W, N, S\}$ est définie comme:

$$I_k(F) = \int_{\Gamma} F d\Gamma. \quad (27)$$

Comme le montre l'équation (22) , les contributions de la dérivée de déplacement intégral de l'équation (27) se composent de deux parties, les degrés de liberté continus et discontinus:

$$\mathbf{d}_k^{i,j} = \mathbf{D}_k^{i,j} + \tilde{\mathbf{D}}_k^{i,j}, \quad (28)$$

où,

$$\mathbf{d}_k^{i,j} = I_k \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (28a)$$

$$\mathbf{D}_k^{i,j} = I_k \left(\frac{\partial \sum_l u_l^i N_l(x)}{\partial x_i} \right), \quad (28b)$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_k^{i,j} = I_k \left(\frac{\partial \sum_j^{n_j} (s_j^n + s_j^f) \sum_I N_I(\mathbf{x}) H_I(\mathbf{x})}{\partial x_i} \right). \quad (28c)$$

En raison de l'équation (28) introduisant les degrés de liberté supplémentaires, nous devons coupler les équations de contrainte de force des fractures, comme indiqué dans les équations (12) et (13). Par conséquent, en intégrant ces deux équations sur un segment de fracture L , on peut obtenir les équations de contrainte de force suivantes en termes de déplacement:

$$\int_0^L \sigma_{j\beta} dL = - \int_0^L \left(\lambda \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + 2G \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} n_x^2 + \frac{\partial u_y}{\partial y} n_y^2 \right) + 2G n_x n_y \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right) dL, \quad (29)$$

$$\int_0^L \tau_{j\beta} dL = \int_0^L G \left(n_y^2 - n_x^2 \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + 2G n_x n_y \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) dL. \quad (30)$$

Similaire à l'équation (28), les contributions de la dérivée intégrale de déplacement comprennent toujours deux parties:

$$\mathbf{d}_L^{i,j} = \mathbf{D}_L^{i,j} + \tilde{\mathbf{D}}_L^{i,j}, \quad (31)$$

où,

$$\mathbf{d}_L^{i,j} = \int_0^L \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) dL, \quad (31a)$$

$$\mathbf{D}_L^{i,j} = \int_0^L \left(\frac{\partial \sum_I u_j^I N_I(x)}{\partial x_i} \right) dL, \quad (31b)$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_L^{i,j} = \int_0^L \left(\frac{\partial \sum_j^{n_j} (s_j^n + s_j^f) \sum_I N_I(\mathbf{x}) H_I(\mathbf{x})}{\partial x_i} \right) dL. \quad (31c)$$

Pour l'intersection de fracture, nous devons ajouter un terme d'interaction entre les segments de fracture en interaction. Pour plus de détails, on peut se référer à [26]. Enfin, nous pouvons obtenir la forme discrète de l'équation d'équilibre des forces:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{xx}^{uu} & \mathbf{K}_{xy}^{uv} & \mathbf{M}_{xs}^{ur} & \mathbf{M}_{xs}^{uf} \\ \mathbf{K}_{yx}^{vu} & \mathbf{K}_{yy}^{vv} & \mathbf{M}_{ys}^{vr} & \mathbf{M}_{ys}^{vf} \\ \mathbf{M}_{sx}^{ru} & \mathbf{M}_{xy}^{rv} & \mathbf{A}_{ss}^{rr} & \mathbf{A}_{ss}^{rf} \\ \mathbf{M}_{sx}^{fu} & \mathbf{M}_{xy}^{fv} & \mathbf{A}_{ss}^{rf} & \mathbf{A}_{ss}^{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ v_y \\ s^r \\ s^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_r \\ B_f \end{bmatrix}, \quad (32)$$

où \mathbf{K}_{ij}^{rs} et \mathbf{A}_{ij}^{rs} représente la matrice de coefficients; B_i est le vecteur de force.

4 Exemples et résultats numériques

Trois cas de test sont conçus pour étudier la précision et l'efficacité du XFEM et du XFVM. Le domaine de calcul et les conditions aux limites sont illustrés à la figure 3. Pour étudier la précision de ces trois cas, les résultats numériques de XFEM et XFVM sont comparés au logiciel commercial (COMSOL), où un solveur FEM standard est implémenté. Ensuite, le modèle de matrice clairsemée discrète et l'efficacité de calcul pour XFEM et XFVM sont discutés.

Fig. 3



Domaine de calcul et conditions aux limites. Les lignes rouges représentent les fractures discrètes. Le point rouge dans le coin gauche indique le puits d'injection et les points bleus dans le coin droit représentent le puits de projection. (a) fracture simple; (b) fractures croisées; (c) huit fractures discrètes.

4.1 Fracture unique

Dans ce cas de test, une seule fracture horizontale est prédéfinie dans le domaine de calcul, comme le montre la figure 3a. La longueur de la matrice carrée et de la fracture est de 100 m et 4 m, respectivement. Les autres paramètres de calcul sont donnés dans le tableau 1. Les conditions aux limites correspondantes sont les suivantes.

1. Conditions aux limites de pression: la pression aux limites gauche et droite est de 10^7 Pa et 10^5 Pa, respectivement; la condition aux limites sans écoulement est appliquée sur les côtés supérieur et inférieur; la pression initiale est nulle.
2. Conditions aux limites de déplacement: les conditions aux limites fixes dans les directions x et y sont appliquées sur les quatre côtés.

Tableau 1 Paramètres de calcul pour ces trois cas de test.

La figure 4a montre les grilles triangulaires libres générées par le COMSOL . Les nombres totaux des éléments de domaine et de frontière sont respectivement de 11 400 et 352. La figure 5a montre les grilles de structure adoptées dans XFEM et XFVM. Il y a 101×101 points de maillage dans la zone de la matrice et 43 maillages pour la fracture. Les distributions de pression obtenues par le COMSOL et le FVM sont illustrées à la figure 6 . Premièrement, en raison de la conductivité plus forte de la fracture, la vitesse interne du fluide est plus rapide et le gradient de pression est plus petit que celui de la matrice. Deuxièmement, nous pouvons voir que les deux groupes de résultats sont en bon accord dans les régions de la matrice et de la fracture. Par conséquent, la solution de l'équation d'écoulement basée sur le FVM est d'abord vérifiée. La figure 7 montre la comparaison des champs de déplacement entre XFEM et XFVM. Les résultats du déplacement dans les directions x et y pour XFEM et XFVM sont très proches de ceux de COMSOL . On peut observer à partir du déplacement en y que la surface de fracture montre une tendance à se refermer sous l'action de la pression interstitielle. Afin de comparer la différence entre eux quantitativement, nous définissons une erreur relative maximale (MRE)

$$\varepsilon_i = \max \left(\frac{F_{\text{ref}} - F_i}{F_{\text{ref}}} \right), \quad (33)$$

où F_{ref} représente les résultats obtenus par COMSOL ; F_i désigne les résultats calculés par XFEM et XFVM.

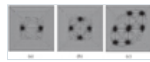


Fig. 4

Grilles de calcul utilisées dans COMSOL . a) 11 400 éléments; (b) 16 130 éléments; (c) 38 914 éléments.

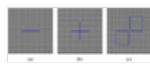


Fig. 5

Grilles de calcul utilisées dans XFEM et XFVM. (a) Matrice: 10 201, fracture: 43; (b) matrice: 10 201, fracture; 84; (c) matrice: 10201, fracture: 232.

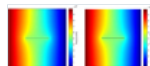


Fig. 6

Comparaison des résultats de la pression du fluide entre COMSOL et FVM.

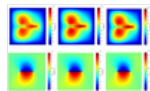


Fig. 7

Comparaisons des champs de déplacement entre COMSOL , XFEM et XFVM pour une fracture unique. La première ligne représente les champs de déplacement dans la direction x , la deuxième ligne représente les champs de déplacement dans la direction y . À gauche: résultats de COMSOL ; au milieu: résultats de XFEM; à droite: résultats de XFVM.

La figure 8 montre les comparaisons de déplacement de la surface supérieure de fracture parmi ces trois groupes de résultats. D'après l'équation (33) , on peut obtenir le MRE le long de la surface de fracture est de 4,54% entre XFEM et COMSOL , et le MRE entre XFVM et COMSOL est de 3,41%.

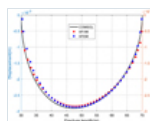


Fig. 8

Comparaison de l' y champ de déplacement de -direction sur la surface supérieure de la fracture entre COMSOL , XFEM et XFVM.

4.2 Deux fractures qui se croisent

Comme le montre la figure 3b , une fracture croisée est considérée dans le domaine. Ces deux fractures ont une longueur de 40 m et l'ouverture est de 10^{-3} m. La coordonnée d'intersection est (50 m, 50 m). Le puits d'injection est situé dans le coin inférieur gauche et la pression d'injection est de 10^7 Pa. Le puits de production est situé dans le coin supérieur droit et la pression de production est de 10^5 Pa. Les conditions aux limites de non-écoulement sont appliquées sur le quatre côtés. Les limites gauche et droite sont fixées dans la direction x . Les limites supérieure et inférieure sont fixées dans la direction y . Le déplacement initial et la pression du fluide sont nuls. Les autres paramètres de calcul sont donnés dans le tableau 1. Comme le montre la figure 4b , le nombre total d'éléments de domaine utilisés dans COMSOL est de 16 130 et le nombre total d'éléments de frontière est de 504. Le nombre total de grilles de matrice et de fracture est de 10 201 et 84, comme le montre la figure 5b .

Les distributions et comparaisons des champs de pression sont illustrées à la figure 9 . Nous pouvons voir que le gradient de pression est plus grand près du puits d'injection et du puits de production, et plus petit près des fractures. Les résultats de FVM sont en bon accord avec ceux de COMSOL . La figure 10 montre la comparaison des résultats du déplacement dans les directions x et y entre COMSOL , XFEM et XFVM pour cette fracture croisée. Nous pouvons voir que, sous l'action de la pression interstitielle, les champs de déplacement dans les directions x et y montrent une tendance à la distribution symétrique. De plus, la solution de XFEM et XFVM est presque la même que celle de COMSOL . La figure 11 montre les comparaisons du déplacement dans le sens x sur la surface supérieure de la fracture horizontale entre COMSOL , XFEM et XFVM. Comme on peut le voir sur la figure 11 , les résultats des champs de déplacement obtenus par XFEM et XFVM sont similaires, mais les résultats de XFEM sont plus proches de ce COMSOL que de XFVM. Le MRE entre XFEM et COMSOL est de 7,97%, et pour le XFVM, il est de 9,67%.

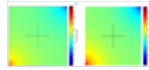


Fig. 9
 Comparaison des résultats de la pression du fluide entre *COMSOL* et *FVM*.

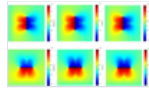


Fig. 10
 Comparaisons des champs de déplacement entre *COMSOL* , *XFEM* et *FVM* pour les fractures croisées. La première ligne représente les champs de déplacement dans la direction *x* , la deuxième ligne représente les champs de déplacement dans la direction *y* . À gauche: résultats de *COMSOL* ; au milieu: résultats de *XFEM*; à droite: résultats de *XFVM*.

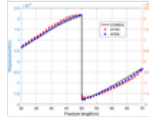


Fig. 11
 Comparaisons du champ de déplacement dans la direction *x* sur la surface supérieure de la fracture horizontale entre *COMSOL* , *XFEM* et *XFVM*.

4.3 Huit fractures discrètes

Dans ce cas de test, nous considérons huit fractures discrètes incluses dans un milieu poreux 2D. Les conditions aux limites de pression et de déplacement sont les mêmes dans le cas 2. Les grilles de calcul adoptées dans *COMSOL* sont illustrées à la [figure 3c](#) . Le nombre total d'éléments est de 38 914 et le nombre total de degrés de liberté est de 98 292. Par contre, les grilles utilisées dans *XFEM* et *XFVM* sont représentées sur la [figure 4c](#) . Le nombre de grilles matricielles est le même avec le cas 1 et le cas 2. Le nombre total de grilles de fracture est de 232. Les autres paramètres connexes sont présentés dans le [tableau 1](#) . La [figure 12](#) montre la comparaison des résultats de pression de fluide entre *COMSOL* et *FVM*. Du fait de l'existence de fractures discrètes, la distribution du champ de pression présente une certaine anisotropie. On constate que ces deux groupes de résultats sont très proches. La [figure 13](#) montre la comparaison des champs de déplacement entre *COMSOL* , *XFEM* et *FVM*. La distribution de la fracture n'étant pas très régulière, la distribution du champ de déplacement présente également une anisotropie. Dans le même temps, nous pouvons clairement voir que les résultats de *XFEM* et *XFVM* sont presque les mêmes que les solutions de référence. Nous choisissons la fracture horizontale au bas de la zone de calcul pour la comparaison de précision, comme le montre la [figure 14](#) . Par rapport à *COMSOL* , le MRE pour le *XFEM* est de 3,03% et de 7,78% pour *XFVM*.

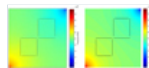


Fig. 12
 Comparaison des résultats de la pression du fluide entre *COMSOL* et *FVM*.

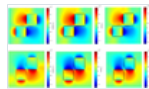


Fig. 13
 Comparaison des champs de déplacement entre *COMSOL* , *XFEM* et *FVM* pour les fractures complexes. La première ligne représente les champs de déplacement dans la direction *x* ; la deuxième ligne représente les champs de déplacement dans la direction *y* . À gauche: résultats de *COMSOL* ; au milieu: résultats de *XFEM*; à droite: résultats de *XFVM*.

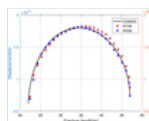


Fig. 14
 Les comparaisons entre *y* champ de déplacement de -direction sur la surface inférieure de fracture horizontale au bas du domaine parmi *COMSOL* , *XFEM* et *XFVM*.

Afin d'étudier la parcimonie de la matrice discrète obtenue par ces deux méthodes, nous définissons les numéros de condition suivants.

$$\text{cond}(\mathbf{K}) = \|\mathbf{K}\| \cdot \|\mathbf{K}^{-1}\| \quad (34)$$

où $\|\mathbf{K}\|$ représente le 2-norme de la matrice \mathbf{K} .

On peut voir qu'à partir de la [figure 15](#) , à mesure que le nombre de fractures augmente, l'augmentation des variables de bloc non diagonal dans la matrice. Bien que le nombre de variables de la matrice creuse obtenue par *XFEM* soit supérieur à celui du *XFVM*, le numéro de condition de la matrice creuse obtenue par *XFVM* est plus grand que le *XFEM*, comme indiqué dans le [tableau 2](#) . Le numéro de condition de la matrice clairsemée dans les cas de fractures croisées est plus grand que les cas non croisés. L'effet pourrait être expliqué par le fait que plus de degrés de liberté doivent être introduits dans l'élément transversal pour *XFEM*, et l'influence entre les différents segments de fracture doit être prise en compte pour *XFVM*. [Tableau 3](#) montre les temps CPU pour ces trois cas de test. Nous pouvons voir que *XFVM* est plus efficace que *XFEM*. La raison en est que *XFEM* calcule principalement la fonction intégrale par intégration numérique représentée dans les équations (20) et (21) . Cependant, *XFVM* peut calculer avec précision la valeur intégrale de la fonction d'intégrande à l'interface de volume de contrôle donnée dans les équations (28) et (31) .

Fig. 15
 Modèle de matrice de parcimonie pour les trois cas. À gauche: *XFEM*; à droite: *XFVM*.

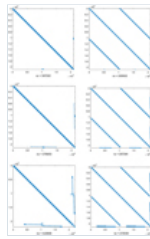


Tableau 2 Numéro de condition de la matrice discrète pour XFEM et XFVM.

Tableau 3 Le temps CPU pour XFEM et XFVM.

5. Conclusion

Dans cette étude, nous discutons de deux méthodes numériques pour simuler la déformation de fracture induite par l'écoulement dans les milieux poreux. Premièrement, les équations d'écoulement sont établies sur la base de la méthode de fracture discrète intégrée et résolues en utilisant la méthode traditionnelle des volumes finis. Ensuite, les équations d'équilibre mécanique sont discrétisées par deux méthodes, XFEM et XFVM. À travers trois exemples de test, nous étudions la précision et l'efficacité de ces deux méthodes en comparaison avec la méthode des éléments finis standard implémentée dans *COMSOL*. Les principales conclusions et remarques peuvent être tirées:

1. Dans le premier cas de test, la précision du calcul numérique de XFEM et XFVM n'est pas très différente. Dans les deux exemples de test suivants, la précision de XFEM est légèrement supérieure à celle de XFVM. Par rapport au *COMSOL*, l'erreur relative maximale parmi ces trois cas pour XFEM est de 7,97% et de 9,67% pour XFVM. Semblable au XFEM, XFVM introduit également la fonction d'enrichissement pour simuler la discontinuité de déplacement de la surface de fracture. Cependant, cette méthode ignore l'influence de la pointe de fracture, elle peut donc perdre une certaine précision.
2. Bien que le numéro de condition de la matrice discrète obtenue par XFVM soit beaucoup plus grand que celui obtenu par XFEM, son efficacité de calcul est 4 à 5 fois supérieure à celle de XFEM. Il y a deux principales raisons. L'un est que XFVM obtient la valeur intégrale de la fonction intégrée par intégration directe hors ligne, tandis que XFEM l'obtient par intégration Gauss en ligne, ce qui consommera beaucoup de temps CPU. L'autre est que XFEM doit ajouter beaucoup de degrés de liberté supplémentaires (au moins quatre degrés de liberté supplémentaires par élément) aux éléments traversés par des fractures. Cependant, pour le XFVM, seuls deux degrés de liberté supplémentaires (composantes de déplacement tangentiel et normal des fractures) doivent être introduits sur les éléments endommagés.
3. Cette étude n'est qu'une discussion préliminaire de ces deux méthodes. Il existe encore de nombreux défis clés pour XFEM et XFVM, qui devraient être abordés dans la simulation numérique des problèmes de déformation induite par l'écoulement. Par exemple, comment simuler plus efficacement la déformation du système de fractures complexes pour le XFEM et garder la matrice discrète non mal conditionnée, et comment simuler plus précisément la déformation des fractures croisées pour le XFVM sous l'action d'une force externe.

Remerciements

L'étude est soutenue par la *National Natural Science Foundation of China* (n° 51936001 et 51706021), le *projet de construction d'équipes innovantes et de développement de carrière d'enseignant pour les universités et collèges de la municipalité de Pékin* (n° IDHT20170507), le *programme de Great Wall Scholar* (N° CIT & TCD20180313) et le *Programme de soutien aux jeunes talents de Beijing* (N° CIT & TCD201804037).

Les références

- Kim J., Tchelepili HA, Juanes R. (2011) Stabilité et convergence des méthodes séquentielles pour l'écoulement couplé et la géomécanique: divisions à contraintes fixes et à déformations fixes, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* 200, 13, 1591-1606. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Huang ZQ, Winterfeld PH, Xiong Y., Wu YS, Yao J. (2015) Simulation parallèle de processus thermo-hydro-mécaniques entièrement couplés dans les fuites de CO₂ à travers les zones de fracture entraînées par fluide, *Int. J. Greenhouse Gas Control* 34, 39-51. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Li S., Li X., Zhang D. (2016) Un modèle tridimensionnel thermo-hydro-mécanique entièrement couplé pour les traitements de stimulation hydraulique, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 34, 64-84. [[Google Scholar](#)]
- Jin L., Zoback MD (2017) Écoulement de fluide non linéaire entièrement couplé et poroélasticité dans des milieux poreux arbitrairement fracturés: un modèle de calcul hybride-dimensionnel, *J. Geophys. Res. : Solid Earth* 122, 10, 7626-7658. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Terzaghi K. (1943) *Mécanique théorique des sols*, John Wiley and Sons, New York, NY. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Biot MA (1941) Théorie générale de la consolidation tridimensionnelle, *J. Appl. Phys.* 12, 2, 155. [[Google Scholar](#)]
- Cheng HD, Abousleiman Y., Detournay E., Cui L., Roegiers JC (1996) Le problème de Mandel revisité, *Géotechnique* 46, 2, 187-195. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Murad MA, Loula AFD (1994) Sur la stabilité et la convergence des approximations par éléments finis du problème de consolidation de Biot, *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 37, 4, 645-667. [[CrossRef](#)] [[MathSciNet](#)] [[Google Scholar](#)]
- Jha B., Juanes R. (2007) Un cadre d'éléments finis localement conservateur pour la simulation de la géomécanique couplée d'écoulement et de réservoir, *Acta Geotech.* 2, 3, 139-153. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Deng Y., Sun D., Liang Y., Yu B., Wang P. (2017) Implémentation de l'algorithme idéal pour les problèmes complexes d'écoulement de fluide incompressible en régime permanent dans la mousse ouverte, *Int. Commun. Chaleur Mass Trans.* 88, 63-73. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

- Li TY, Gao YQ, Han DX, Yang FS, Yu B. (2020) Un nouveau modèle d'ordre réduit POD basé sur EDFM pour le transfert de chaleur en régime permanent et transitoire dans un réservoir géothermique fracturé, *Int. J. Heat Mass Trans.* 146, 2020, 118783. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Vasilyeva M., Chung ET, Efendiev Y., Kim J. (2018) Upscaling basé sur la minimisation d'énergie contrainte pour l'écoulement couplé et la mécanique, *J.Comput. Phys.* 376, 660–674. doi: [10.1016 / j.jcp.2018.09.054](#) . [[Google Scholar](#)]
- Asadi R., Ataie-Ashtiani B., Simmons CT (2014) Stratégies de couplage de volumes finis pour la solution d'un modèle de consolidation de Biot, *Comput. Geotech.* 55, 494–505. [[Google Scholar](#)]
- Nordbotten MJ (2014) Simulation hydromécanique à volumes finis en milieu poreux, *Water Res. Res.* 50, 5, 4379–4394. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Tang T., Hededal O., Cardiff P. (2015) Sur la mise en œuvre de la méthode des volumes finis du modèle de sol poro-élasto-plasticité, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 39, 13, 1410–1430. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Nilsen HM, Nordbotten J., Raynaud X. (2018) Comparaison entre les schémas de discrétisation centrés sur les cellules et basés sur les nœuds pour l'élasticité linéaire, *Comput. Geosci.* 22, 1, 233–260. [[Google Scholar](#)]
- Suliman R., Oxtoby OF, Malan AG, Kok S. (2014) Une méthode de volumes finis améliorée pour modéliser des structures élastiques linéaires 2D, *Appl. Math. Modèle.* 38, 7–8, 2265–2279. [[Google Scholar](#)]
- Belytschko T., Black T. (1999) Croissance élastique de fissures dans les éléments finis avec remaillage minimal, *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 45, 5, 601–620. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Bordas S., Nguyen PV, Dunant C., Guidoum A., Nguyen-Dang H. (2007) Une bibliothèque d'éléments finis étendue, *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 71, 6, 703–732. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Yan X., Huang Z., Yao J., Li Y., Fan D., Zhang K. (2018) Un modèle hydro-mécanique efficace pour les milieux poreux à plusieurs porosités couplées et à fracture discrète, *Comput. Mech.* 62, 943–962. [[Google Scholar](#)]
- Shi F., Wang X., Liu C., Liu H., Wu H. (2017) Une méthode basée sur xfem avec une technique de réduction pour la modélisation de la propagation de fractures hydrauliques dans des formations contenant des fractures naturelles par frottement, *ing. Fract. Mech.* 173, 64–90. [[Google Scholar](#)]
- Ucar E., Keilegavelen E., Berre I., Nordbotten JM (2018) A discrétisation en volumes finis pour la déformation de milieux fracturés, *Comput. Geosci.* 22, 4, 993–1007. [[Google Scholar](#)]
- Deb R., Jenny P. (2014) Modélisation de la défaillance le long de plans prédéfinis dans des réservoirs fracturés, dans: *Proceedings, Thirty-Ninth Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA. [[Google Scholar](#)]
- Deb R., Jenny P. (2017) Modélisation basée sur les volumes finis de la rupture par cisaillement induite par l'écoulement le long des manifolds de fracture, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 41, 3, 1922–1942. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Deb R., Jenny P. (2017) Modélisation de la rupture par cisaillement dans les réservoirs fracturés à matrice poreuse, *Comput. Geosci.* 21, 5–6, 1119–1134. [[Google Scholar](#)]
- Deb R. (2018) Modélisation numérique de la rupture par cisaillement induite par injection de fluide, ouverture en traction et couplage mécanique de l'écoulement, Thèse de doctorat, ETH, Zurich. [[Google Scholar](#)]
- Karvounis DC, Jenny P. (2016) Modèle de fracture hiérarchique adaptatif pour systèmes géothermiques améliorés, modèle multi-échelle. *Simul.* 14, 1, 207-231. [[Google Scholar](#)]
- Lee SH, Lough MF, Jensen CL (2001) Modélisation hiérarchique de l'écoulement dans des formations naturellement fracturées à plusieurs échelles de longueur, *Water Resour. Res.* 37, 3, 443–455. [[Google Scholar](#)]
- Moïnfar A., Sepehrnoori K., Johns RT, Varavei A. (2013) Géomécanique couplée et simulation d'écoulement pour un modèle de fracture discrète embarqué, *Society of Petroleum Engineers*. [[Google Scholar](#)]
- Gunnar J., Miller SA (2017) Sur le rôle des contraintes thermiques lors de la stimulation hydraulique des réservoirs géothermiques, *Geofluids* 2017, 1–15. [[Google Scholar](#)]
- Gunnar J., Valley B., Miller SA (2018) Module matlab THERMAID-A pour la modélisation thermo-hydraulique et l'analyse de la stabilité des fractures dans les réservoirs fracturés, [arXiv: 1806.10942 \[physics.comp -ph\]](#) [[Google Scholar](#)]
- Shah S., Møyner O., Tene M., Lie K.-A., Hajibeygi H. (2016) La méthode de base lissée par restriction multi-échelles pour les milieux poreux fracturés (F-MsRSB), *J. Comput. Phys.* 318, 36–57. [[Google Scholar](#)]
- Peaceman DW (1983) Interprétation des pressions de bloc de puits dans la simulation numérique de réservoir avec des blocs de grille non carrés et une perméabilité anisotrope, *Soc. Animal de compagnie. Eng. J.* 8, 3, 183–194. [[Google Scholar](#)]

Tous les tableaux

Tableau 1 Paramètres de calcul pour ces trois cas de test.

[Dans le texte](#)

Tableau 2 Numéro de condition de la matrice discrète pour XFEM et XFVM.

[Dans le texte](#)

Tableau 3 Le temps CPU pour XFEM et XFVM.

[Dans le texte](#)

Tous les chiffres

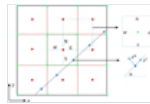


Fig. 1

Le schéma du modèle intégré de fracture discrète (EDFM). Les points rouges représentent les grilles matricielles, dont la pression du fluide de stockage; les points bleus désignent les grilles de fracture, qui stockent la pression de fracture et le déplacement pour le XFVM; les points vert clair stockent le déplacement de la matrice pour le XFVM et le XFEM; e, w, n, s représentent l'interface du volume de contrôle; E, W, N, S représentent l'interface interne dans un volume de contrôle.

[Dans le texte](#)

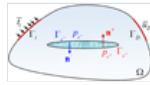


Fig. 2

Un corps élastique bidimensionnel avec une fracture interne.

[Dans le texte](#)



Fig. 3

Domaine de calcul et conditions aux limites. Les lignes rouges représentent les fractures discrètes. Le point rouge dans le coin gauche indique le puits d'injection et les points bleus dans le coin droit représentent les puits de projection. (a) fracture simple; (b) fractures croisées; (c) huit fractures discrètes.

[Dans le texte](#)

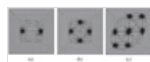


Fig. 4

Grilles de calcul utilisées dans *COMSOL*. a) 11 400 éléments; (b) 16 130 éléments; (c) 38 914 éléments.

[Dans le texte](#)

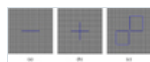


Fig. 5

Grilles de calcul utilisées dans XFEM et XFVM. (a) Matrice: 10 201, fracture: 43; (b) matrice: 10 201, fracture; 84; (c) matrice: 10201, fracture: 232.

[Dans le texte](#)

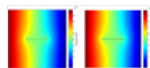


Fig. 6

Comparaison des résultats de la pression du fluide entre *COMSOL* et FVM.

[Dans le texte](#)

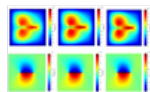


Fig. 7

Comparaisons des champs de déplacement entre *COMSOL*, XFEM et XFVM pour une fracture unique. La première ligne représente les champs de déplacement dans la direction x , la deuxième ligne représente les champs de déplacement dans la direction y . À gauche: résultats de *COMSOL*; au milieu: résultats de XFEM; à droite: résultats de XFVM.

[Dans le texte](#)

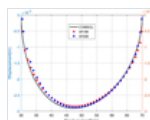


Fig. 8

Comparaison de l' y champ de déplacement de -direction sur la surface supérieure de la fracture entre *COMSOL*, XFEM et XFVM.

[Dans le texte](#)

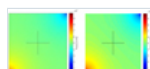


Fig. 9

Comparaison des résultats de la pression du fluide entre *COMSOL* et FVM.

[Dans le texte](#)

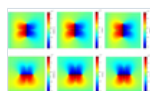


Fig. 10

Comparaisons des champs de déplacement entre *COMSOL*, XFEM et XFVM pour les fractures croisées. La première ligne représente les champs de déplacement dans la direction x , la deuxième ligne représente les

champs de déplacement dans la direction y . À gauche: résultats de *COMSOL*; au milieu: résultats de *XFEM*; à droite: résultats de *XFVM*.

[Dans le texte](#)

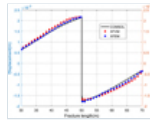


Fig. 11

Comparaisons du champ de déplacement dans la direction x sur la surface supérieure de la fracture horizontale entre *COMSOL*, *XFEM* et *XFVM*.

[Dans le texte](#)

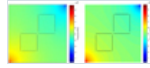


Fig. 12

Comparaison des résultats de la pression du fluide entre *COMSOL* et *FVM*.

[Dans le texte](#)

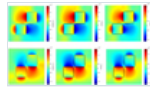


Fig. 13

Comparaison des champs de déplacement entre *COMSOL*, *XFEM* et *FVM* pour les fractures complexes. La première ligne représente les champs de déplacement dans la direction x ; la deuxième ligne représente les champs de déplacement dans la direction y . À gauche: résultats de *COMSOL*; au milieu: résultats de *XFEM*; à droite: résultats de *XFVM*.

[Dans le texte](#)

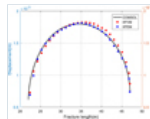


Fig. 14

Les comparaisons entre y champ de déplacement de -direction sur la surface inférieure de fracture horizontale au bas du domaine parmi *COMSOL*, *XFEM* et *XFVM*.

[Dans le texte](#)

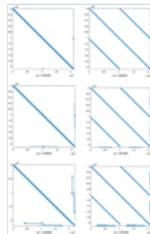


Fig. 15

Modèle de matrice de parcimonie pour les trois cas. À gauche: *XFEM*; à droite: *XFVM*.

[Dans le texte](#)