

Algorithmes d'invasion percolation

Dans ce chapitre, nous expliquons d'abord comment la compréhension des mécanismes de la migration des hydrocarbures dans les bassins sédimentaires nous a permis d'élaborer des algorithmes d'invasion percolation. Nous introduisons de manière synthétique les concepts de zone de percolation et d'accumulation ainsi que le calcul des potentiels, essentiels à chaque étape de la simulation de la migration avec ce type de modèle. Dans un premier paragraphe, nous commençons donc par reprendre les principes de base de la migration des hydrocarbures et nous rappelons quelques définitions utiles. Ensuite nous détaillons le premier algorithme, obtenu à partir de cette réflexion ; celui-ci est adapté à un maillage structuré permettant par la suite de pouvoir faire des comparaisons avec le modèle darcéen, lui-aussi adapté à ce type de maillage. Enfin nous décrivons un deuxième algorithme d'invasion percolation, apportant une réelle amélioration sur un certain nombre de points, et adapté à des maillages complexes.

5.1 Principes de base et définitions

5.1.1 Principes de base

On se place dans un bassin dont on connaît l'histoire et les propriétés (lithologie, pression, porosité, température, volume...). De plus, on connaît sur un sous ensemble de mailles, dites roches-mères, la quantité d'huile générée au cours d'une période déterminée.

Dans le cas d'un bloc 3D simulé à l'aide du logiciel Temis[®], on travaille sur un domaine maillé où les propriétés sont localisées en un point situé au centre de chaque maille.

On note **satex**(M) la saturation d'expulsion d'une maille M. Cela correspond à la saturation d'huile nécessaire pour que l'huile puisse complètement traverser la maille M.

On note **satir**(M) la saturation irréductible en eau d'une maille M.

Ces deux seuils correspondent aux points limites des courbes de pression capillaire et de perméabilité relative (cf. paragraphe 3.1.3).

On note **so**(M) la saturation en huile de la maille M, $\rho_w(M)$ et $\rho_o(M)$ les densités respectivement de l'eau et de l'huile de la maille M.

Les seuils de saturation et de pression capillaire sont les paramètres fondamentaux du modèle d'invasion percolation. Ce sont eux qui vont déterminer les chemins de migration et la localisation des accumulations mais aussi, dans une moindre mesure, le volume d'huile résiduelle ou accumulée au cours de la migration.

La migration s'organise depuis les points sources qui sont caractérisés initialement par une quantité d'huile générée, qui est expulsée. En partant de la maille sur laquelle pointe la source que l'on nomme **maille source**, on génère des chemins de migration passant par des connexions entre mailles. Dans le cas du premier algorithme présenté (cf. paragraphe 5.2), les connexions sont les faces des mailles. Cette connectivité est assez naturelle au sens des volumes finis et est utilisée par le modèle darcéen détaillé dans le paragraphe 4.1.2. Le deuxième algorithme, adapté aux maillages non structurés, utilise une connexion entre mailles par les nœuds, ce qui offre plus de possibilités. Les motivations du choix de ce type de connexion sont expliquées dans le paragraphe 5.3.

Une **zone de percolation** est donc un ensemble de mailles traversées par de l'huile provenant d'un même point source (cf. point bleu). Par construction, il s'agit d'un ensemble de mailles connexes.

Les mailles situées au voisinage d'un ensemble de mailles prédéfinies mais n'appartenant pas à cet ensemble sont appelées **mailles périphériques** ou mailles voisines de cet ensemble. Les mailles périphériques de la zone de percolation Z_p sont indiquées par un point blanc sur le schéma de la figure 5.1.

On dit qu'une maille M est **accumulée** lorsque sa saturation, $so(M)$, est égale à $1-satir(M)$ (indiquée par un point orange sur la figure 5.1). Les mailles du chemin de migration ont une saturation comprise entre $satex(M)$ et $1-satir(M)$ (indiquées par un point jaune sur la figure 5.1).

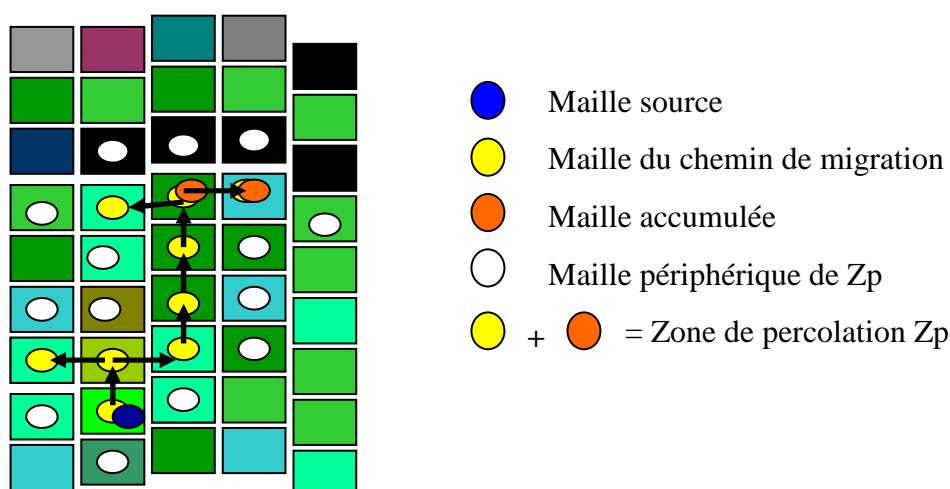


Figure 5.1 : Schéma d'une zone de percolation dans le cas particulier d'une connectivité par les faces.

Un champ de pression capillaire hétérogène est représenté par des mailles de couleurs distinctes ; les mailles de couleur noire ayant la plus forte valeur de pression capillaire et les mailles en bleu clair les plus faibles valeurs de pression capillaire.

On appelle **zone d'accumulation** un ensemble connexe de mailles accumulées, entre lesquelles il existe une communication de pression (Figure 5.2). Cette communication de pression se traduit ainsi : deux mailles voisines accumulées appartiennent à la même zone d'accumulation si et seulement si l'huile est libre de migrer dans les deux sens entre ces deux mailles (Carruthers, 2003).

Au cours des étapes de la migration, deux zones d'accumulation qui sont voisines peuvent fusionner pour ne former plus qu'une seule zone d'accumulation. C'est le mécanisme normal de formation des accumulations de taille raisonnable dans un milieu hétérogène et il est crucial de savoir le traiter correctement.

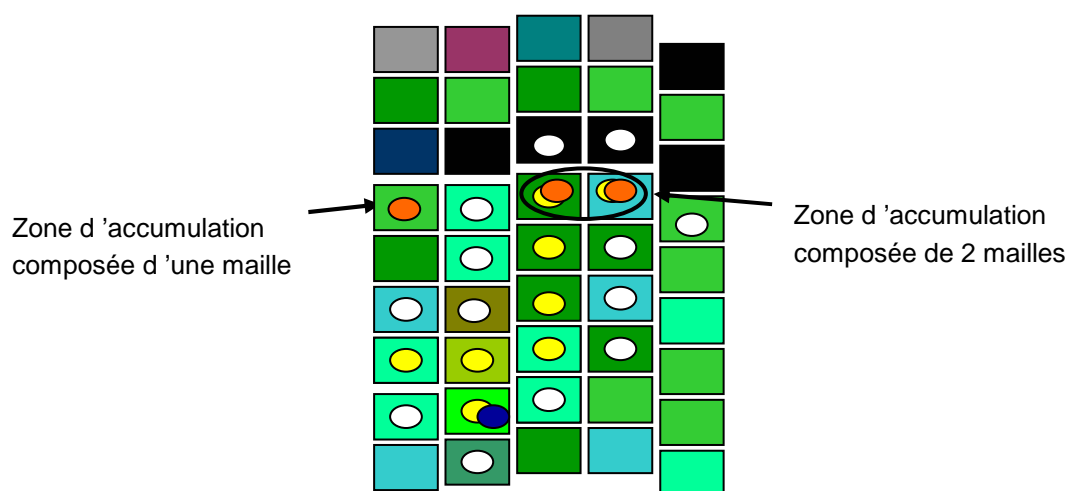


Figure 5.2 : Schéma d'une zone d'accumulation dans le cas particulier d'une connectivité par les faces.

L'algorithme d'invasion percolation est un algorithme séquentiel dans lequel on vide successivement l'ensemble des **sources** d'hydrocarbures identifiées. Pour une source donnée à laquelle est associée une quantité d'hydrocarbures Q_0 , partant de la maille source, on développe progressivement une zone de percolation jusqu'à ce que la source soit tarie.

5.1.2 Définition des potentiels

A chacune des étapes de l'algorithme d'invasion percolation, on a besoin de comparer plusieurs mailles afin de trouver un chemin préférentiel. Ces choix se font simplement en comparant des potentiels statiques ou dynamiques dont la formule dépend des propriétés physiques intrinsèques des mailles mises en jeu ainsi que de leur appartenance à une accumulation. La formule proposée dans ce paragraphe est relativement générale, même si la mise à jour du potentiel dynamique peut demander une implémentation particulière.

Pression de seuil d'une maille

Chaque maille M a un seuil de pression capillaire P_{cth} correspondant à la pression nécessaire pour que l'huile traverse complètement la maille (liée à σ_{atex}). Cette pression dépend des propriétés de la maille M dont notamment la porosité (cf. paragraphe 3.1.3.1).

Prise en compte de l'hydrodynamisme

Pour rendre compte de l'influence de l'hydrodynamisme sur la migration, on ajoute un terme de surpression dans le calcul du potentiel. Cette surpression liée uniquement aux déplacements d'eau dans le bassin, notée *O_{Phydro}*, est extraite des résultats de la simulation d'un calcul de pression avec le modèle de Darcy monophasique du calculateur Visco. Cette variable mesure la différence de pression observée relativement à un état d'équilibre hydrostatique. Elle permet d'avoir un champ de pression non vertical. C'est une donnée explicite du problème qu'il ne faut pas confondre avec les pressions de flottabilité et "d'explosion" (cf. paragraphes suivants) exercées sur une accumulation d'huile qui sont des paramètres dynamiques calculés par l'algorithme d'invasion percolation.

Potentiel statique

Le potentiel statique d'une maille *M*, noté Ψ_s est égal à la somme de la pression de seuil et de la surpression hydrodynamique de la maille :

$$\Psi_s(M) = P_{cth}(M) + O_{Phydro}(M)$$

Ce potentiel est dit statique car *P_{cth}* et *O_{Phydro}* sont des données d'entrée de l'algorithme d'invasion percolation qui resteront inchangées pendant les différentes étapes de migration, au cours d'un événement donné. Le champ de potentiel statique est la principale caractéristique locale utilisée par l'algorithme, il constitue le support du système pétrolier.

Pression de flottabilité

On note $P_b(\text{connect}, M)$ la pression de flottabilité d'une maille *M* au niveau d'une connexion (face ou nœud). Si la connexion est une face, c'est la pression de flottabilité au niveau de cette face vue du côté de la maille *M*. Si la connexion est un nœud, c'est la pression de flottabilité obtenue en ce nœud vue de la maille *M*.

Remarque. La continuité de la pression de flottabilité n'est pas automatiquement assurée au niveau de la connexion.

Dans le cas d'une connectivité par les faces, il est nécessaire de préciser en quel point de la face a lieu la migration. Dans l'algorithme présenté dans le paragraphe 5.2, ce point correspond au centre de la face. Contrairement aux volumes finis, la mesure de la face d'échange n'est pas utilisée pour déterminer les flux d'hydrocarbures, seule la capacité de connexion nous intéresse.

Si *M* appartient à une zone d'accumulation *Z_{acc}* alors

$$P_b(\text{connect}, M) = (\rho_w(M) - \rho_o(M))g(z(\text{connect}, M) - z_{\min}(Z_{acc})),$$

Sinon

$$P_b(\text{connect}, M) = 0$$

Où :

$z(\text{connect}, M)$ est la cote de la connexion d'une maille *M*. Si la connexion est une face, cela correspond à la cote du centre de la face de la maille *M*. Si la connexion est un nœud, cela correspond à la cote de ce nœud de la maille *M*.

$z_{\min}(Z_{acc})$ correspond à la cote de la base de la zone d'accumulation *Z_{acc}*. Il sera défini ultérieurement de manière plus précise pour chaque algorithme.

Pression "d'explosion"

Lorsque la zone de percolation Z_p contient uniquement des mailles accumulées et que la pression de flottabilité n'est pas suffisante pour percer les barrières capillaires, le système pétrolier a la capacité de générer une surpression artificielle. La pression nécessaire pour traverser une nouvelle maille du voisinage de Z_p est appelée pression d'explosion et est notée P_{explos} .

Le choix de la nouvelle maille à traverser dépend du potentiel statique et de la cote de la maille. Ces critères sont en accord avec les mécanismes de la migration dans les bassins présentés dans le chapitre 3.

P_{explos} est liée à une zone d'accumulation qui est composée d'huile connectée hydrauliquement ce qui permet de transmettre cette surpression instantanément à l'ensemble des mailles accumulées. On peut traduire P_{explos} en terme de hauteur d'huile. Dans ce cas, on peut introduire un z_{min} artificiel associé. La figure 5.3 illustre de manière schématique ce concept.

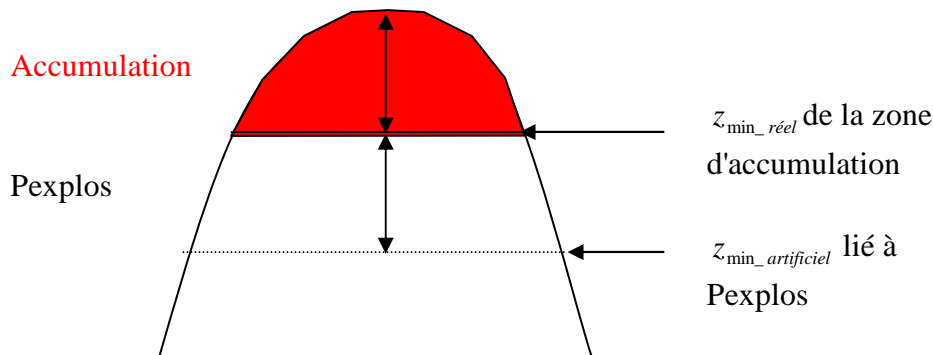


Figure 5.3 : Hauteur d'huile artificielle.

P_{explos} s'ajoute à la pression de flottabilité P_b et l'introduction du contact artificiel permet d'unifier les deux notions :

$$P_b(connect, M) = (\rho_w(M) - \rho_o(M))g(z(connect, M) - z_{min_réel}(Zacc)),$$

$$P_{explos}(Zacc) = (\rho_w(M) - \rho_o(M))g(z_{min_réel}(Zacc) - z_{min_artificiel}(Zacc))$$

Potentiel dynamique

Le potentiel dynamique d'une maille M appartenant à une zone de percolation Z_p caractérise la capacité du système percolant à générer un chemin dans cette direction. Il dépend de la maille M , de l'accumulation $Zacc$ à laquelle elle appartient ainsi que de la connexion considérée selon la formule suivante :

$$\Psi_d(connect, M) = P_{cth}(M) + O_{Phydro}(M) + P_b(connect, M) + P_{explos}(Zacc)$$

↑ ↑ ↑ ↑
liée aux liée à modifiée pendant la modifiée pendant la
propriétés de l'hydrodynamisme migration migration
la maille liée à liée à une Zacc liée à une Zacc

}
 potentiel statique $\Psi_s(M)$

On retrouve donc une partie statique à laquelle s'ajoutent les pressions de flottabilité et d'explosion qui sont modifiées dynamiquement au cours du déroulement de l'algorithme de percolation.

Remarque. Dans une action d'invasion de la zone de percolation vers son voisinage, la maille périphérique V visée a un potentiel égal à son potentiel statique, i.e. :

$$\Psi(V) = \Psi_s(V) = P_{cth}(V) + O_{Phydro}(V)$$

Ainsi, les choix d'invasion ne sont pas guidés par l'histoire des mailles voisines ni par leur niveau de remplissage mais uniquement par leurs propriétés initiales.

Remarque. La fracturation hydraulique peut impacter l'intégrité d'une roche-couverture. Ce phénomène peut être pris en compte avec les modèles de Darcy et d'invasion percolation mais n'est pas abordé dans cette thèse.

5.1.3 Définition des sources

5.1.3.1 Types de sources

Dans un bassin sédimentaire, pour un événement donné, on peut recenser plusieurs types de sources d'hydrocarbures :

- L'huile positionnée dans les mailles lors des événements précédents et qui peut être déstabilisée suite à une déformation du bassin ou à un changement des conditions de pression et température,
- Les sources associées aux nouveaux apports d'hydrocarbures générés par les roches-mères au cours de la période considérée.

Ces sources peuvent être traitées de manière générique en associant à une source s , une quantité d'huile, notée $Q_0(s)$, non nulle et une maille source. Seule change la manière dont on initialise la quantité $Q_0(s)$.

5.1.3.2 Sources d'huile remobilisable dans le bassin

Au cours d'une simulation, la géométrie du bassin change et les différentes couches de sédiments déjà déposées subissent une déformation. Cette modification de géométrie entraîne un changement des propriétés de chacune des mailles dont notamment leur porosité et leur hauteur réelle.

Si on suppose que l'on se trouve au milieu d'une simulation et que le bassin contient des mailles M dont la saturation en huile n'est pas nulle, on peut décomposer en deux parties la quantité d'huile $q_0(M)$ de ces mailles. En effet, on peut toujours considérer qu'une partie de cette quantité d'huile reste bloquée dans la maille alors qu'une autre partie est mobilisable:

$$q_0(M) = q_{0_bloquée} + q_{0_mobilisable}$$

Cette quantité bloquée est la quantité d'huile nécessaire pour que la saturation en huile de la maille soit égale à la saturation d'expulsion, $satex(M)$.

La quantité d'huile mobilisable ne restera pas forcément dans la maille M mais pourra être redistribuée dans le bassin tout comme l'huile issue des roches-mères.

Remarque. Pour chaque période considérée $]t^n, t^{n+1}]$, on utilise la géométrie et les propriétés statiques des mailles calculées par le modèle de bassin au temps t^{n+1} . En particulier, ces paramètres sont considérés comme constants durant le déroulement de l'algorithme.

Calcul pratique :

Les mailles qui nous intéressent sont les mailles telles que :

$$qo^n(M) > qo_bloquée$$

avec :

$$qo^n(M) = \varphi^n \rho^n vol^n so^n(M) \text{ et } qo_bloquée = \varphi^{n+1} \rho^{n+1} vol^{n+1} satex$$

où :

$qo^n(M)$ désigne la quantité d'huile de la maille M calculée au temps t^n correspondant à la fin de la période précédente,

$qo_bloquée$ est la quantité d'huile nécessaire pour que la saturation de la maille soit égale à $satex$,

φ , ρ et vol sont respectivement la porosité, la densité et le volume de la maille.

Pour chacune de ces mailles M, on crée une source à laquelle on affecte le surplus d'huile, c'est-à-dire, dont la quantité $Qo(s)$ est telle que :

$$Qo(s) = qo_remobilisable = qo^n(M) - qo_bloquée.$$

De plus, pour faciliter un traitement automatique, on enregistre pour chaque source la maille M depuis laquelle elle a été créée.

5.1.3.3 Sources provenant d'une roche-mère

Au cours de la période considérée, chaque roche-mère génère une quantité d'huile, notée $qo_générée$. C'est le module de craquage qui calcule cette quantité.

Pour chacune de ces roches-mères, on crée une source dont la quantité $Qo(s)$ est égale à la quantité générée: $Qo(s) = qo_générée$.

On enregistre la maille ou l'ensemble des mailles liées à la roche-mère depuis laquelle elle a été créée.

Remarque. Au lieu d'avoir une source pointant sur un ensemble de mailles, on peut considérer autant de sources que de mailles liées à une roche-mère. Le regroupement des sources permet théoriquement de réduire le nombre d'étapes de l'algorithme. Cependant cette association n'est pas gratuite, car elle demande de définir une stratégie de remplissage ad-hoc pour le groupe de mailles sources concernées. Dans notre cas, nous nous sommes contentés d'associer une maille à une source.

5.1.3.4 Calcul de la génération des hydrocarbures

La génération des hydrocarbures est à la charge du module de craquage. Celui-ci s'appuie sur des modèles cinétiques et sur la notion de quantité de matière organique disponible initialement (cf. annexe C). La masse d'huile engendrée par craquage du kérogène au cours de la période $]t^n, t^{n+1}]$, est donnée par :

$$qo_générée = \int_{t^n}^{t^{n+1}} -\rho_s IH TOC vol_s \sum_{i=1}^L \frac{dx_i}{dt}$$

où :

x_i est le potentiel partiel de kérogène,

L est le nombre de réactions,

ρ_s est la densité de la matière solide,
 vol_s est le volume solide,
 IH est le potentiel initial du kérogène,
 TOC est la proportion de kérogène contenu dans le sédiment.

5.1.4 Utilisation de l'algorithme et notations

5.1.4.1 Utilisation

A chaque pas de temps, le bassin est déformé et les roches-mères sont susceptibles d'engendrer un nouvel apport d'hydrocarbures. On se retrouve alors avec un ensemble de sources qui proviennent soit de la déformation du bassin, soit des roches-mères. Le but de l'algorithme d'invasion percolation est de vider pour chacune des sources s , la quantité d'huile $Qo(s)$ dans le bassin. Au cours de cette opération, des zones d'accumulation peuvent être créées.

L'ordre dans lequel on vide les sources peut avoir des conséquences sur le résultat. Pour le premier algorithme présenté dans le paragraphe 5.2, nous avons décidé dans un premier temps de vider les sources provenant de la déformation du bassin puis celles provenant des roches-mères. Pour le deuxième algorithme, adapté aux maillages non structurés, nous avons choisi de traiter en même temps les deux types de provenance des sources.

Dans notre cas où on considère un seul composé, l'ordre dans lequel les différentes sources sont vidées n'a pas d'influence sur le résultat final. En revanche, si chaque source génère un composé d'huile différent, le résultat peut dépendre de l'ordre dans lequel les sources ont été visitées. En effet, la composition finale des accumulations dépend de l'ordre d'arrivée des constituants. Les sources pourraient être triées à nouveau selon des considérations physiques (priorité à l'huile moins visqueuse ou plus légère) ou numériques (pour accélérer le temps de calcul). On pourrait aussi imaginer des systèmes de réalisations multiples dans lesquels on donnerait, comme résultat de simulation, la composition moyenne et sa variabilité.

Ces points importants concernant la reproductibilité du résultat et les incertitudes qui lui sont attachées ne sont pas considérés dans cette thèse, que ce soit en mono-composant ou en compositionnel.

5.1.4.2 Notations

Pour la description des deux algorithmes d'invasion percolation, on utilisera les notations suivantes :

- **satex(M)** : saturation d'expulsion d'une maille M
- **satir(M)** : saturation irréductible en eau d'une maille M
- **so(M)** : saturation en huile d'une maille M
- **$\rho_w(M)$** : densité de l'eau dans une maille M
- **$\rho_o(M)$** : densité de l'huile dans une maille M
- **g** : valeur algébrique de la pesanteur
- **z(connect,M)** : cote de la connexion d'une maille M
 Si la connexion est une face, cela correspond à la cote du centre de la face de la maille M;
 Si la connexion est un noeud, cela correspond à la cote de ce noeud de la maille M.
- **OHydro(M)** : surpression d'une maille M
- **Pcth(M)** : pression de seuil (ou aussi pression d'entrée capillaire) d'une maille M
- **Pb(connect,M)** : pression de flottabilité d'une maille M liée à l'une de ses connexions (face ou noeud)

- **Pexplos(M)** : pression d'explosion d'une maille M
- **Ψs(M)** : potentiel statique d'une maille M
- **Ψd(connect,M)** : potentiel dynamique d'une maille M lié à l'une de ses connexions (face ou nœud)
- **Zp** : zone de percolation
- **Zacc(Zp)** : zone d'accumulation de Zp

De plus, pour les deux algorithmes, on associe à chaque zone de percolation Z_p un ensemble de mailles noté **T(Zp)** représentant la tête de Z_p . Cette tête est définie de manière spécifique pour chacun des algorithmes et permet d'optimiser la recherche d'une nouvelle maille à envahir d'hydrocarbures.

5.2 Algorithme d'invasion percolation adapté aux maillages structurés

Ce paragraphe fournit une description de l'algorithme de migration par invasion percolation, adapté aux maillages structurés et utilisant une connectivité par les faces. Il a été implémenté dans le calculateur Visco du logiciel de simulation de bassin Temis®. On commence par introduire la notion de statut d'une maille d'une zone de percolation et par revenir sur la définition de la pression de flottabilité dans le cas spécifique des maillages structurés avec le choix d'une connectivité par les faces. On décrit ensuite l'algorithme de manière générale. Toutes ses étapes sont détaillées dans l'annexe A. Enfin, on présente des résultats de simulation obtenus sur quelques cas tests synthétiques.

5.2.1 Statut d'une maille d'une zone de percolation et pression de flottabilité

Dans le paragraphe 5.1, nous avons défini une zone de percolation comme un ensemble de mailles connexes traversées par de l'huile provenant d'un même point source (cf. point bleu sur la figure 5.4).

Dans le cadre du premier algorithme, on affecte un statut à une maille d'une zone de percolation. Cette dernière peut être :

- soit **activée** : $\text{satex}(M) \leq \text{so}(M) < 1 - \text{satir}(M)$ (indiquée par un point jaune sur la figure 5.4)
- soit **accumulée** : $\text{so}(M) = 1 - \text{satir}(M)$ (indiquée par un point orange sur la figure 5.4)

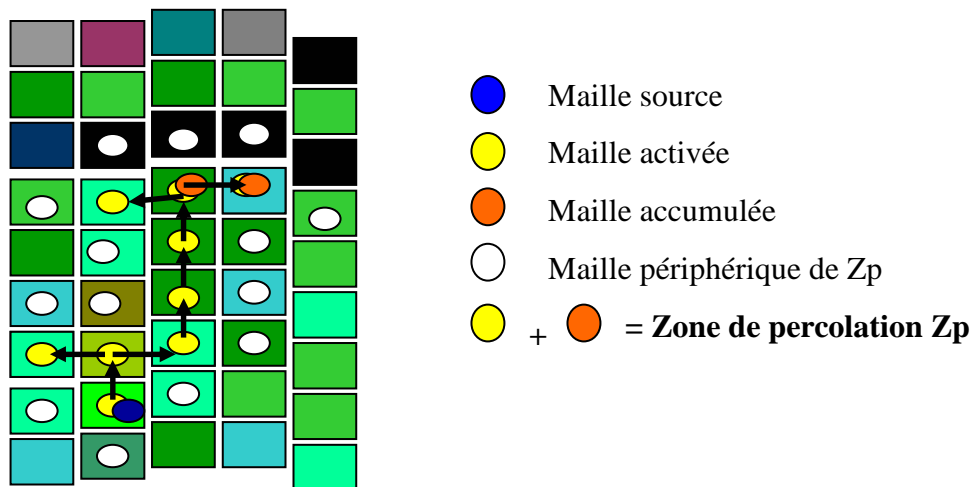


Figure 5.4 : Schéma d'une zone de percolation.

En général, une zone de percolation peut contenir zéro, une ou bien plusieurs zones d'accumulations. On peut donc décomposer un zone de percolation Z_p de la manière suivante:

$$Z_p = \bigcup_{i=1}^{nbZacc} Z_{acc}^i \quad \cup \quad Z_{path}(Z_p)$$

↑
↑

union des zones d'accumulation appartenant à Z_p
ensemble des mailles non accumulées de Z_p

où $Z_{path}(Z_p)$ désigne l'ensemble des mailles non accumulées de Z_p .

Dans toute la suite du paragraphe 5.2, on suppose que la densité de l'eau et celle de l'huile, ρ_w et ρ_o , sont constantes et ne dépendent pas de la pression ou de la température.

En suivant les notations données dans 5.1.2, on note $P_b(face, M)$ la pression de flottabilité d'une face vue du côté de la maille M .

Si M appartient à une zone d'accumulation Z_{acc} alors

$$P_b(face, M) = (\rho_w - \rho_o)g(z(face, M) - z_{min}(Z_{acc})),$$

sinon

$$P_b(face, M) = 0,$$

où :

$z(face, M)$ est la cote du centre de la face considérée de la maille M ,

$z_{min}(Z_{acc})$ est la cote de la base de la zone d'accumulation Z_{acc} .

La figure 5.5 illustre de manière schématique, comment est calculée la pression de flottabilité.

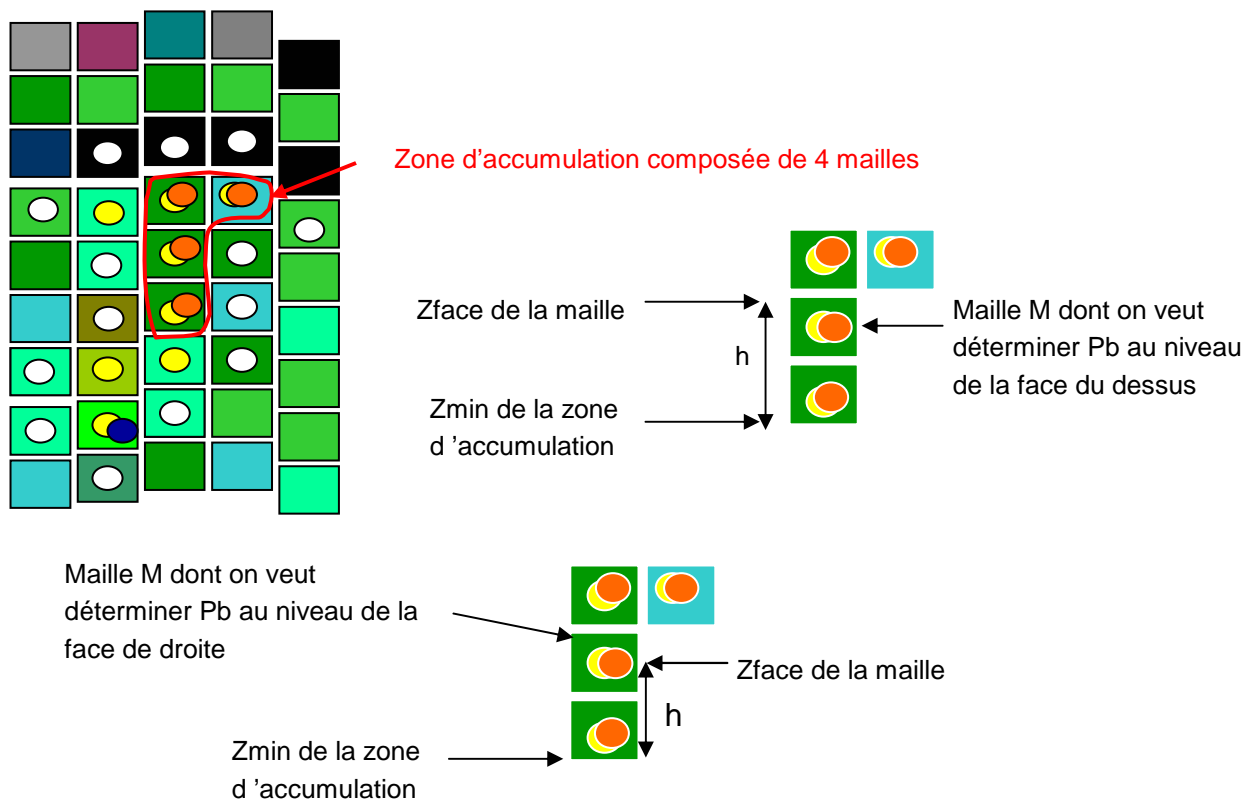


Figure 5.5 : Schéma de la pression de flottabilité.

5.2.2 Description de l'algorithme

L'algorithme suivant a pour objectif de vider une quantité d'huile $Q_0(s)$ disponible au niveau d'une source s . Il prend en compte la préférence à la migration verticale vers le haut (cf. paragraphe 3.3). Pour simplifier la présentation, on suppose que la source pointe sur une seule maille.

On associe à une zone de percolation Z_p un ensemble de mailles, noté $\mathbf{T}(Z_p)$, représentant la tête de Z_p . Le concept de tête sera détaillé par la suite.

On introduit les notations suivantes :

- $\mathbf{ztop}(M)$: cote du toit d'une maille M , i.e. cote du centre de la face du toit de M ,
- $\mathbf{zbot}(M)$: cote du bas d'une maille M , i.e. cote du centre de la face du bas de M ,
- $\mathbf{Msource}$: la maille sur laquelle pointe la source,
- \mathbf{P} : l'ensemble des mailles périphériques de $\mathbf{T}(Z_p)$.

Définition de $\mathbf{T}(Z_p)$:

On note :

- $\mathbf{Mhead}(Z_p)$: la dernière maille activée de la zone de percolation Z_p ,
- Z_{acc}^{head} avec $head \in [1, nbZ_{acc}]$: la dernière zone d'accumulation activée de Z_p .

La tête de Z_p est définie par :

$$\mathbf{T}(Z_p) = \{\mathbf{Mhead}(Z_p)\} \cup Z_{acc}^{head}$$

En suivant les étapes de l'algorithme, on assure que les deux ensembles $\{\mathbf{Mhead}(Z_p)\}$ et Z_{acc}^{head} ne peuvent pas être vides en même temps. En effet, partant d'une configuration de ce type, l'algorithme produit toujours une configuration du même type.

Le tableau 5.1 décrit pour chaque configuration de $\mathbf{T}(Z_p)$, les étapes réalisables au cours de l'algorithme. Dans la figure 5.6, on représente de manière schématique les changements de configuration opérés lors d'une étape de l'algorithme. Les configurations initiales sont en vert, les étapes réalisables sont en turquoise et les configurations possibles à la suite d'une étape sont en violet.

	$\mathbf{T}(Z_p) = \{\mathbf{Mhead}(Z_p)\}$	$\mathbf{T}(Z_p) = \{\mathbf{Mhead}(Z_p)\} \cup Z_{acc}^{head}$	$\mathbf{T}(Z_p) = Z_{acc}^{head}$
Activation	possible	possible	possible
Accumulation	possible	possible	impossible
Suppression	impossible	impossible	possible

Tableau 5.1 : Etapes réalisables au cours de l'algorithme suivant les valeurs de $\mathbf{T}(Z_p)$.

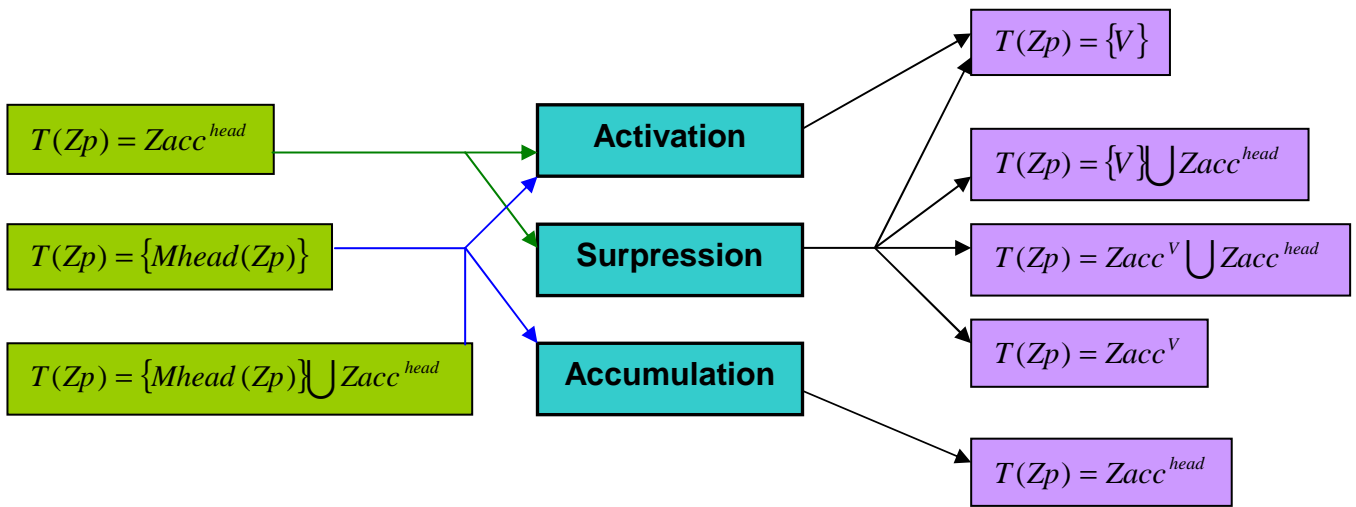


Figure 5.6 : Schéma des changements de configuration opérés lors d'une étape de l'algorithme.

Algorithme d'invasion percolation adapté aux maillages structurés :

➤ Initialisation

- ◆ $Z_p = \{M_{source}\}$
- ◆ $T(Z_p) = \{M_{source}\}$

➤ Tant que $Q_0(s) > 0$:

- ◆ Si essai positif d'**activation** de $V \in P \setminus Z_p$ par $M \in T(Z_p)$ tel que $z_{top}(V) \geq z_{top}(M)$:
 - activation de V
 - $T(Z_p) = \{V\}$
- ◆ Sinon si $T(Z_p) = \{M_{head}(Z_p)\}$ ou $T(Z_p) = \{M_{head}(Z_p)\} \cup Z_{acc}^{head}$:
 - **accumulation** de la maille $M_{head}(Z_p)$
 - $T(Z_p) = Z_{acc}^{head}$ où $M_{head}(Z_p) \in Z_{acc}^{head}$
- ◆ Sinon (on a $T(Z_p) = Z_{acc}^{head}$) :
 - **suppression** limitée par $V_{explos} \in P$ et $M \in T(Z_p)$
 - Si $V_{explos} \notin Z_p$
 - o activation de V_{explos}
 - Si test de potentiels validé pour M et V_{explos}
 - o Si V_{explos} non accumulée
 - $T(Z_p) = \{V_{explos}\} \cup Z_{acc}^{head}$
 - o Sinon
 - $T(Z_p) = Z_{acc}^{fusion}$ (fusion de Z_{acc}^{head} et $Z_{acc}^{V_{explos}}$ où $V_{explos} \in Z_{acc}^{V_{explos}}$)
 - Sinon
 - o Si V_{explos} non accumulée
 - $T(Z_p) = \{V_{explos}\}$
 - o Sinon
 - $T(Z_p) = Z_{acc}^{V_{explos}}$ où $V_{explos} \in Z_{acc}^{V_{explos}}$

Traitement des conditions aux limites :

Dans le cas où une maille M de $T(Zp)$ est une maille d'un bord du bassin, on a deux possibilités :

- Soit le bord est fermé, dans ce cas, la maille M n'a pas de maille voisine par rapport à la face de bord.
- Soit le bord est ouvert, dans ce cas :
 - ◆ si c'est le toit du bassin, on considère que la maille M a une voisine V au toit telle que:
 $z_{top}(V) = \underset{M}{Max}(z_{top}(M))$; $P_{cth}(V)=0$; $O_{Phydro}(V)=0$ et V peut contenir une quantité d'huile infinie. Cette maille V fictive appartient à l'ensemble P.
 - ◆ si c'est un bord latéral, on considère que la maille M a une voisine V par rapport à la face de bord telle que:
 $z_{top}(V) = z_{top}(M)$; $P_{cth}(V)=0$; $O_{Phydro}(V)$ dépend des conditions aux limites latérales et V peut contenir une quantité d'huile infinie. Cette maille V fictive appartient à l'ensemble P.

Ainsi, les bords ouverts font partie du domaine de recherche, ce qui permet d'activer une maille V fictive ayant la capacité de recevoir une quantité d'huile infinie et donc de vider la source en une seule étape. Dans le cas où le domaine ne comporte pas de bord ouvert, on doit forcer l'arrêt de l'algorithme si toutes les mailles sont accumulées.

Détails concernant l'étape de surpression :

Dans ce cas, on a plusieurs possibilités :

- Soit on arrive à activer une nouvelle maille de P.
- Soit $T(Zp) = \{V_{explos}\}$ ou $T(Zp) = \{V_{explos}\} \cup Zacc^{head}$, alors on a l'assurance que l'étape d'après sera :
 - ◆ soit une activation
 - ◆ soit une autre surpression
- Soit $T(Zp) = Zacc^{fusion}$ ou $T(Zp) = Zacc^{V_{explos}}$, alors à l'étape d'après on aura :
 - ◆ soit une activation
 - ◆ soit une autre surpression

5.2.3 Résultats

Dans ce paragraphe, nous présentons des résultats obtenus, à l'aide d'un prototype codé sous Matlab, sur quelques tests synthétiques réalisés avec un maillage fixe. L'objectif de cette série de tests est de valider le comportement numérique de l'algorithme d'invasion percolation pour des cas de figures simplifiés. Le maillage est fixe, les sources sont définies dès le début et la quantité d'hydrocarbures qui leur est associée est une donnée. On fournit directement la pression d'entrée capillaire sous la forme d'une variable constante par maille.

La saturation irréductible en eau, sat_{ir} , est égale à 0 et la saturation d'expulsion, sat_{ex} , est égale à 0.5. La densité de l'eau est égale à 1000 kg.m^{-3} , celle de l'huile est égale 900 kg.m^{-3} . Nous avons également pris pour chaque maille une porosité égale à 1.

Remarque. Des tests plus réalistes représentatifs des conditions rencontrées dans les études de bassin sont présentés dans les chapitres 6 et 8.

5.2.3.1 Premier cas

Ce premier cas synthétique est une section 2D avec un maillage régulier composé de 4 couches de 6 mailles. Les couches de cette section ont un pendage uniforme de 10%. Les dimensions des mailles sont approximativement de 1 km dans chacune des directions. Toutes les mailles ont une pression d'entrée capillaire égale à 3 MPa, à part dans la zone de piège constituée d'un groupe de 4 mailles (en bleu sur la figure 5.7) avec une pression d'entrée capillaire nulle.

La source d'hydrocarbures pointe sur une maille située en bas à gauche de la section (Figure 5.7) et sa quantité associée est égale à 7.5 tonnes.

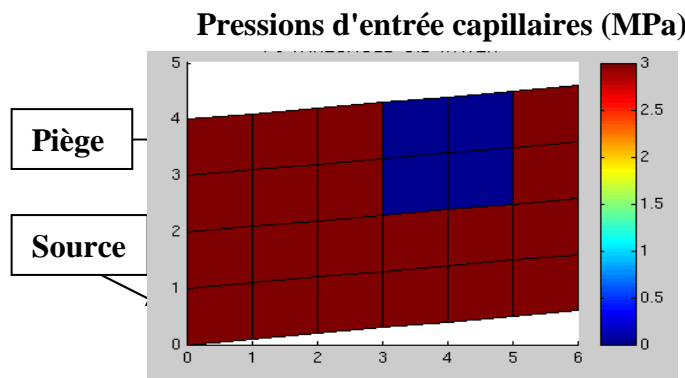


Figure 5.7 : Premier cas synthétique. Description des pressions d'entrée capillaires.

Les hydrocarbures migrent verticalement depuis la source jusqu'au toit de la section, puis ils continuent leur migration latéralement vers la droite jusqu'à ce qu'ils arrivent dans la zone piège. Ce piège est complètement rempli par les hydrocarbures. Dans la zone d'accumulation formée, comme la pression de flottabilité ne suffit pas pour sortir du piège, une surpression se crée, ce qui permet d'atteindre la maille en haut à droite de la section. La figure 5.8 montre les saturations d'hydrocarbures obtenues ainsi que la séquence de remplissage correspondant à l'ordre dans lequel les mailles ont été visitées (si une maille donnée est visitée plusieurs fois, on retient uniquement le numéro de l'étape de la dernière visite).

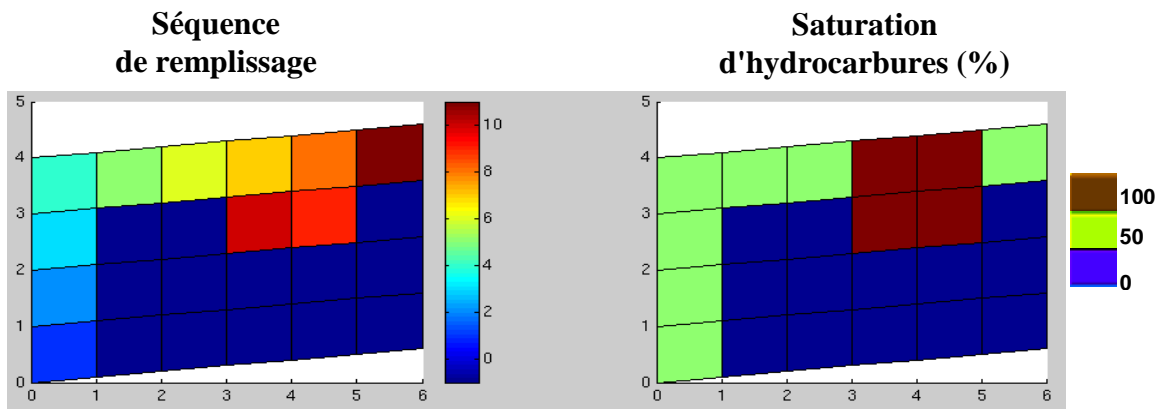


Figure 5.8 : Premier cas synthétique. Séquence de remplissage et saturation d'hydrocarbures.

5.2.3.2 Deuxième cas

Le deuxième cas synthétique est une section 2D représentant un anticlinal. Le maillage est composé de 30 couches de 50 mailles. Toutes les mailles ont une pression d'entrée capillaire nulle hormis celles de la barrière capillaire composée de 4 couches et qui ont des valeurs variables en fonction de leur position sur l'axe horizontal (Figure 5.9).

La source d'hydrocarbures pointe sur une maille située en bas à gauche de la section (Figure 5.9) et la quantité associée est égale à 15 tonnes.

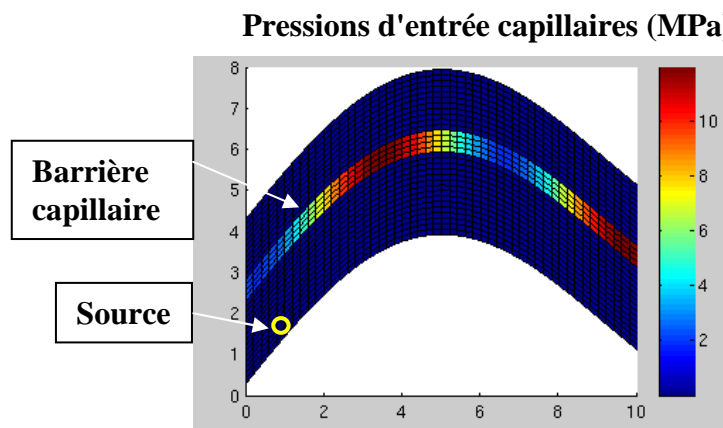


Figure 5.9 : Deuxième cas synthétique.
Description des pressions d'entrée capillaires.

Les hydrocarbures migrent verticalement depuis la source jusqu'à ce qu'ils atteignent la barrière capillaire. Ils s'accumulent ensuite sous la barrière jusqu'à ce que la zone d'accumulation ait la pression suffisante pour percer la barrière à l'endroit où cette dernière a sa plus faible pression capillaire. Une fois la barrière franchie, les hydrocarbures migrent verticalement vers le toit du domaine où ils forment ensuite une autre accumulation jusqu'à ce que la source soit tarie. La figure 5.10 montre les résultats obtenus pour les saturations d'hydrocarbures.

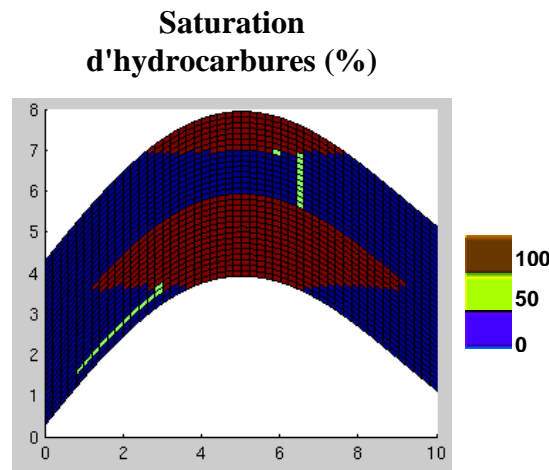


Figure 5.10 : Deuxième cas synthétique.
Saturation d'hydrocarbures.

5.2.3.3 Troisième cas

Le troisième cas synthétique est une section 2D représentant un double anticlinal. Le maillage est composé de 20 couches de 50 mailles. Toutes les mailles ont une pression d'entrée capillaire nulle hormis celles des 2 barrières capillaires (Figure 5.11). La première barrière a une pression d'entrée capillaire uniforme dont la valeur est égale à 4 MPa; pour la deuxième, la pression d'entrée capillaire est égale à 2 MPa sur la partie gauche de la section et à 8 MPa sur la partie droite.

La source d'hydrocarbures pointe sur une maille située en bas à gauche de la section (Figure 5.11) et la quantité d'huile associée est égale à 20 tonnes.

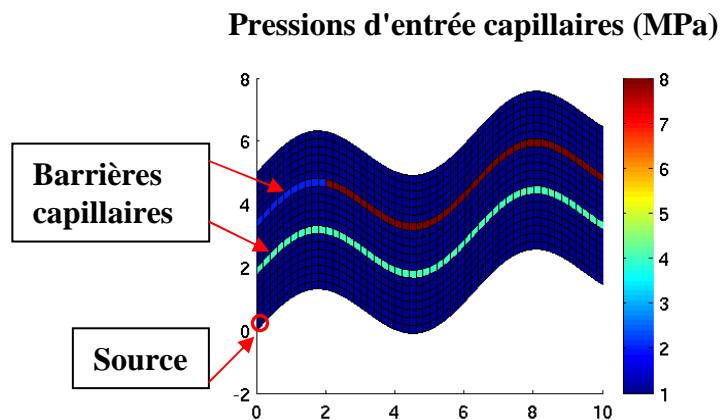


Figure 5.11 : Troisième cas synthétique.
Description des pressions d'entrée capillaires.

Les hydrocarbures migrent verticalement depuis la source jusqu'à ce qu'ils atteignent la première barrière capillaire. Ils forment ensuite une première zone d'accumulation. Dès que le bas de cette zone d'accumulation atteint un point de fuite, les hydrocarbures migrent vers le deuxième point haut sous la barrière capillaire. Puis ils forment une deuxième zone d'accumulation. Lorsque celle-ci atteint la pression de flottabilité lui permettant d'être égale à la pression d'entrée capillaire de la barrière, les hydrocarbures peuvent traverser la barrière. Ils migrent ensuite verticalement jusqu'à ce qu'ils atteignent la seconde barrière capillaire. Une troisième zone d'accumulation se forme, puis les hydrocarbures atteignent un point de fuite. Ceci leur permet de former une quatrième zone d'accumulation. Comme sur la partie gauche de la barrière la pression capillaire est plus faible, cette zone d'accumulation arrive à atteindre la pression nécessaire pour percer la barrière. Le même processus continue pour former la dernière zone d'accumulation. La figure 5.12 montre la séquence de remplissage (correspondant à l'ordre dans lequel les mailles ont été visitées) ainsi que les saturations d'hydrocarbures obtenues et les zones d'accumulation numérotées de 1 à 5.

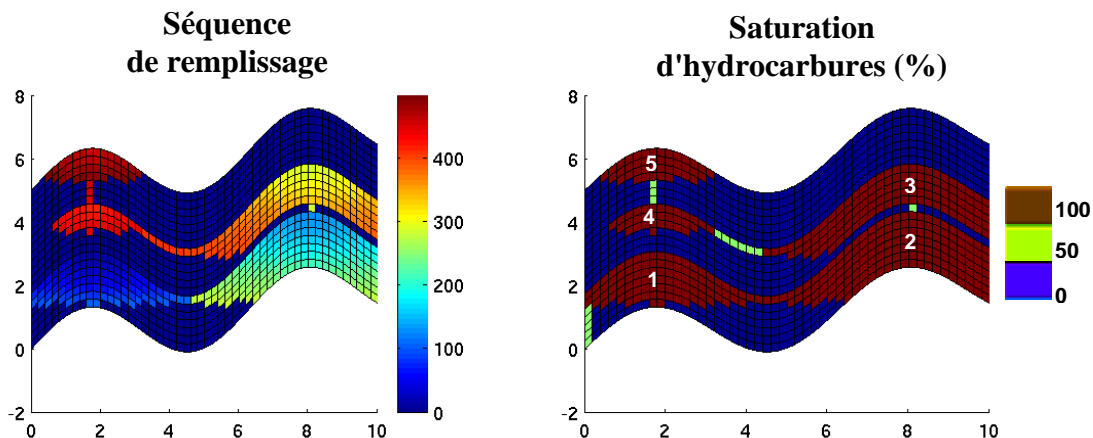


Figure 5.12 : Troisième cas synthétique.
Séquence de remplissage et saturation d'hydrocarbures.

5.2.4 Conclusion

Dans le paragraphe 5.2, nous avons présenté un algorithme d'invasion percolation adapté aux maillages structurés intégrant la notion de préférence à la migration verticale. Les tests effectués ont permis de montrer sa capacité à fournir des résultats où l'on distingue correctement les accumulations que l'on arrive à ordonner en fonction de leur séquence de remplissage. Dans l'annexe A, nous avons également répondu à certaines questions concernant la terminaison de l'algorithme en un nombre fini d'étapes.

Cet algorithme peut aussi être appliqué à des tests de tailles plus importantes et dans des configurations habituelles à la modélisation de bassin. Des résultats obtenus sur des cas d'études réels sont présentés dans le chapitre 6.

Toutefois, les tests effectués ont mis en évidence quelques défauts, par rapport au mécanismes de migration, dont notamment l'approximation grossière du plan de contact eau/huile qui a pour conséquence une surestimation de la quantité d'huile laissée dans les accumulations.

5.3 Algorithme d'invasion percolation adapté aux maillages non structurés

Dans ce paragraphe, on présente un algorithme de migration par invasion percolation adapté aux maillages non structurés. C'est une évolution de l'algorithme d'invasion percolation sur maillage structuré décrit dans le paragraphe 5.2. Dans ce nouvel algorithme, la migration de l'huile d'une maille vers sa voisine utilise la connexion par les nœuds ce qui offre plus de liberté aux chemins de migration. De plus, un calcul de contact eau/huile se fait à l'intérieur de chaque maille. Ce nouvel algorithme a aussi l'avantage de pouvoir s'appliquer à des maillages complètement non structurés, ce qui est indispensable pour traiter des géométries complexes (formations chevauchées, biseaux stratigraphiques, etc...). Les calculs de saturation et de quantité d'huile laissée dans chacune des mailles sont donc plus précis. On peut, par exemple, obtenir des saturations d'huile comprises entre s_{atex} et $1-s_{atir}$, ce qui n'était pas le cas auparavant. Le calcul du plan de contact eau/huile dans chaque maille permet à l'huile de migrer dès que la hauteur d'huile nécessaire pour traverser une barrière est atteinte. L'algorithme prend en compte les mécanismes principaux de la migration secondaire : la flottabilité, la capillarité, l'hydrodynamisme, et est adapté aux géométries évolutives.

On commence par rappeler les raisons qui ont motivé l'écriture de ce nouvel algorithme et les principes sur lesquels il se base. On décrit ensuite l'algorithme de manière générale. Toutes ses étapes sont détaillées dans l'annexe B. Enfin, on présente des résultats de simulation obtenus sur quelques cas tests synthétiques.

5.3.1 Motivations et principes de base de l'algorithme

Nous avons vu dans le chapitre 2 qu'il existe différents types de pièges pétroliers : structuraux, stratigraphiques ou mixtes.

En général, les hydrocarbures commencent par remplir le haut d'un piège, juste en-dessous de la roche couverture. Ils peuvent alors s'accumuler jusqu'à atteindre un point de fuite (cas d'un "spill"), ou bien jusqu'à ce qu'ils arrivent à vaincre la pression capillaire et à percer la roche couverture (cas d'un "leak").

Les situations de "spill" et de "leak" sont représentées schématiquement par la figure 5.13 :

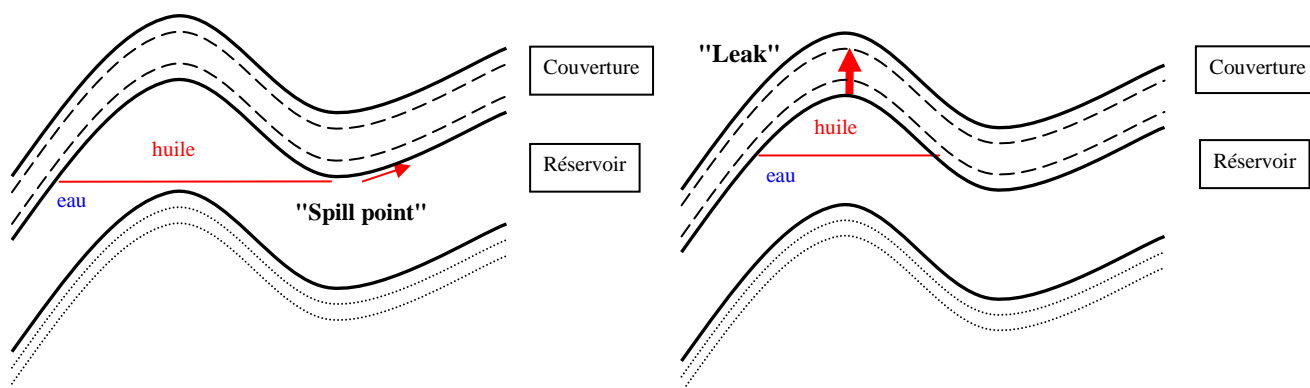


Figure 5.13 : Représentation schématique d'un "spill" et d'un "leak".

L'étude de l'accumulation des pièges fondée sur ces principes simples, nous a amenés à écrire un nouvel algorithme.

Comme pour l'algorithme adapté aux maillages structurés présenté dans le paragraphe 5.2, on se place dans un bassin dont on connaît l'histoire et les propriétés de chaque maille (lithologie, pression, porosité, température, volume...). Le bloc peut avoir une géométrie non structurée, définie comme un ensemble de mailles polyédriques quelconques partageant un nombre quelconque de noeuds. On suppose que chaque maille possède des propriétés physiques propres et qu'on peut balayer les mailles de son voisinage.

Selon les notations introduites dans le paragraphe 5.1.4.2, le potentiel d'une maille M est défini par :

$$\Psi_d(n,M) = \underbrace{P_{cth}(M) + O_{Phydro}(M)}_{\text{potentiel statique } \Psi_s(M)} + P_{b(n,M)} + P_{explos}(M)$$

↑ liée aux propriétés de la maille
↑ liée à l'hydrodynamisme
↑ modifiée pendant la migration liée à une Zacc
↑ modifiée pendant la migration

Contrairement à l'algorithme présenté dans le paragraphe 5.2, la pression de flottabilité n'est plus liée à une face de la maille M mais à un de ses noeuds :

$$Pb(n, M) = (\rho_w(M) - \rho_o(M))g(z(n, M) - z_{\min}(M, Zacc))$$

Où $z_{\min}(M, Zacc)$ est lié à la maille M et à la zone d'accumulation Zacc à laquelle la maille M appartient. Les détails de la mise à jour de $z_{\min}(M, Zacc)$ sont explicités par la suite.

5.3.2 Description de l'algorithme

5.3.2.1 Définitions

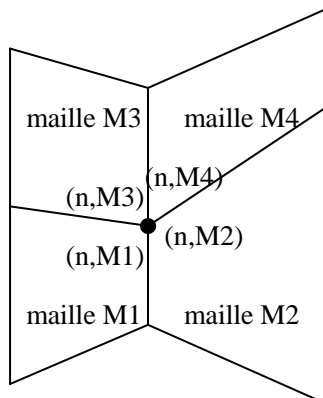
On garde la même définition d'une **zone d'accumulation** Zacc, présentée dans le paragraphe 5.2; c'est un ensemble connexe de mailles accumulées entre lesquelles il existe une communication de pression. Pour chaque maille M d'une zone d'accumulation Zacc, on définit une variable locale, notée $z_{\min}(M, Zacc)$, qui évolue en même temps que la zone d'accumulation Zacc. Cette variable correspond à une notion étendue du plan de contact eau/huile.

Nœuds et mailles :

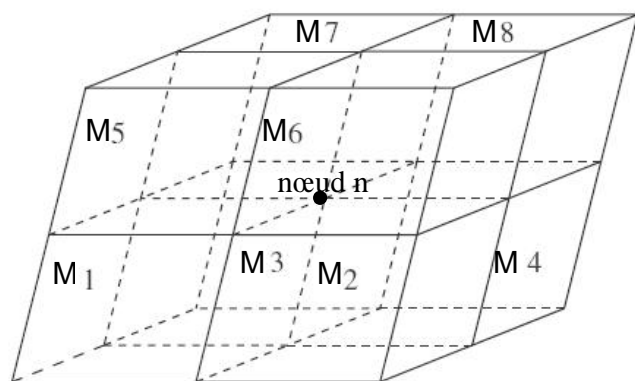
Topologie mailles, nœuds

L'algorithme d'invasion percolation présenté dans ce paragraphe utilise la connectivité des mailles via les nœuds (Figure 5.14). Les propriétés topologiques utiles qui en découlent sont les suivantes :

- Une maille connaît tous ses nœuds.
- A partir d'un nœud n, on peut accéder à toutes ses mailles voisines, i.e. toutes les mailles qui ont ce nœud en commun.
- Deux nœuds d'une même maille peuvent être mis en relation par une action interne à la maille elle-même.



Maillage 2D quadrangulaire



Maillage 3D hexaédrique

Figure 5.14 : Voisins d'un nœud n pour des maillages quadrangulaire et hexaédrique.

Nœud accumulé

Un nœud n d'une maille M appartenant à une zone d'accumulation Zacc a le statut **accumulé** si et seulement si : $z(n, M) > z_{\min}(M, Zacc)$.

Remarque. Un noeud n peut avoir le statut accumulé pour une maille M_1 (i.e. (n, M_1) accumulé) et non accumulé pour une maille M_2 voisine de M_1 (i.e. (n, M_2) non accumulé).

Noeud limite

Un noeud n d'une maille M appartenant à une zone d'accumulation Z_{acc} est un noeud **limite** si et seulement si : $z(n, M) = z_{\min}(M, Z_{acc})$.

Différence de potentiels :

Dans le cas d'un "remplissage":

On ajoute l'huile nécessaire dans une maille M donnée afin d'atteindre un noeud de fuite potentielle n' interne à cette maille. Cette étape est illustrée schématiquement par la figure 5.15.

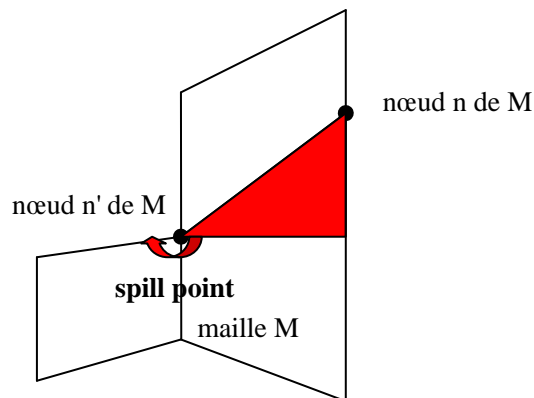


Figure 5.15 : Schéma d'une étape de remplissage afin d'atteindre un noeud de fuite potentielle n' .

On a : $\Delta P(n', M) = -(\rho_w(M) - \rho_o(M))g(z(n', M) - z_{\min}(M, Z_{acc}))$

Remarque. $z_{\min}(M, Z_{acc})$ est ici la valeur obtenue au cours des étapes précédentes. Une fois cette étape terminée, on fait la mise à jour : $z_{\min}(M, Z_{acc}) = z(n', M)$.

Dans le cas d'une "percée":

On ajoute l'huile nécessaire dans une maille M donnée afin d'accéder à une maille voisine M' . Le point de percée est le noeud n commun aux deux mailles (Figure 5.16).

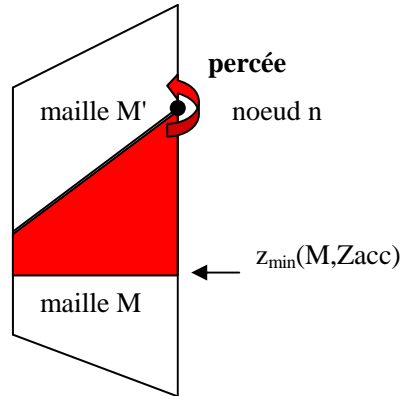


Figure 5.16 : Schéma d'une étape de percée de la maille M à sa maille voisine M' par le noeud de percée n.

On a :
$$\Delta P(n, M, M') = \Psi_S(M') - \Psi_S(M) - (\rho_w(M) - \rho_o(M))g(z(n, M) - z_{\min}(M, Zacc))$$

$$= \Psi_S(M') - \Psi_d(n, M)$$

Remarque. $z_{\min}(M, Zacc)$ est ici la valeur obtenue au cours de l'étape courante.

Listes d'une zone d'accumulation :

Pour chaque zone d'accumulation $Zacc$, on gère deux listes :

- la liste des ΔP nécessaires pour atteindre un noeud d'une des mailles de $Zacc$ qui n'est pas accumulé:
 $liste_rempl = \{\Delta P(n', M); n' \in M, z(n', M) < z_{\min}(M, Zacc); M \in Zacc\}$
- la liste des ΔP nécessaires pour atteindre une maille voisine des mailles de $Zacc$ à partir d'un de leurs noeuds :
 $liste_percee = \{\Delta P(n, M, M'); n \in M, z(n, M) \geq z_{\min}(M, Zacc); M \in Zacc, M' \notin Zacc\}$

Etapes de l'algorithme:

A chaque nouvelle étape de l'algorithme :

- soit on fait une migration interne à une maille M, i.e. on passe d'un noeud n à un noeud n' de la maille M. On utilise alors un ΔP de la liste_percee tel que $\Delta P \leq 0$ (Figure 5.17).

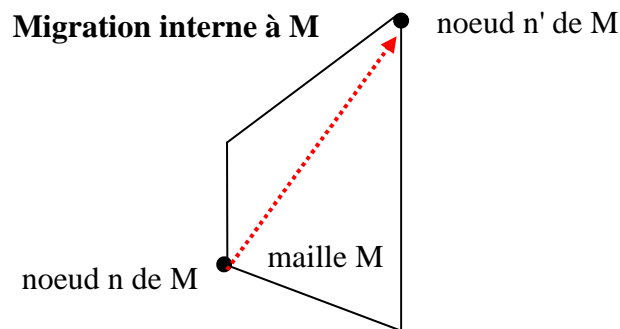


Figure 5.17 : Schéma d'une étape de migration interne dans une maille M.

- soit on effectue une percée vers une maille voisine à partir d'un noeud accumulé. On utilise alors un ΔP de la liste_pecree tel que $\Delta P > 0$ (Figure 5.18).

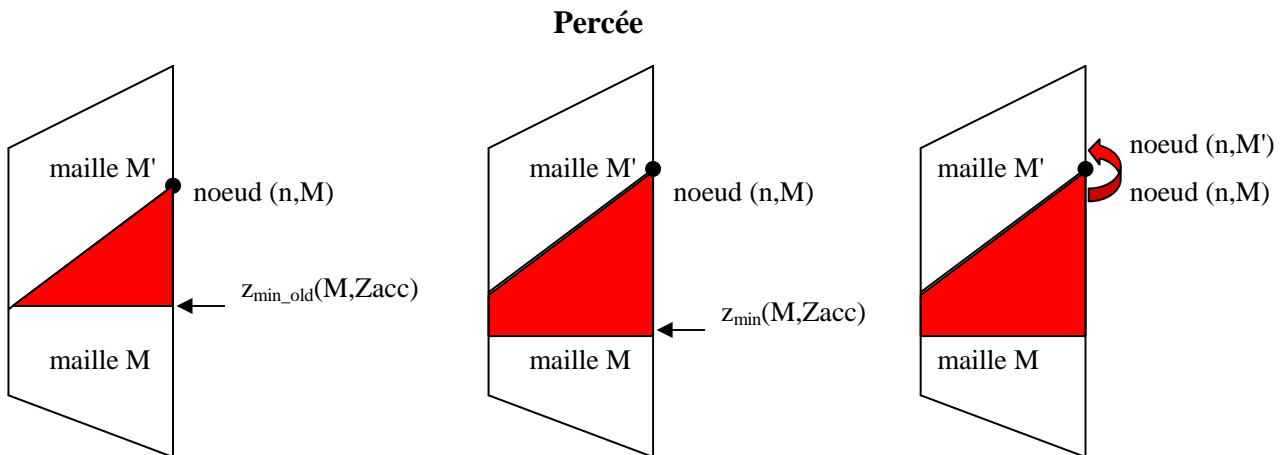


Figure 5.18 : Détail d'une étape de percée. La maille est remplie jusqu'à ce qu'il y ait suffisamment d'huile pour arriver à aller dans une maille voisine M' par le noeud de percée n .

- soit on effectue un remplissage de manière à atteindre un noeud de fuite potentielle n' qui n'est pas encore accumulé. On utilise alors un ΔP de la liste_rempl tel que $\Delta P > 0$ (Figure 5.19).

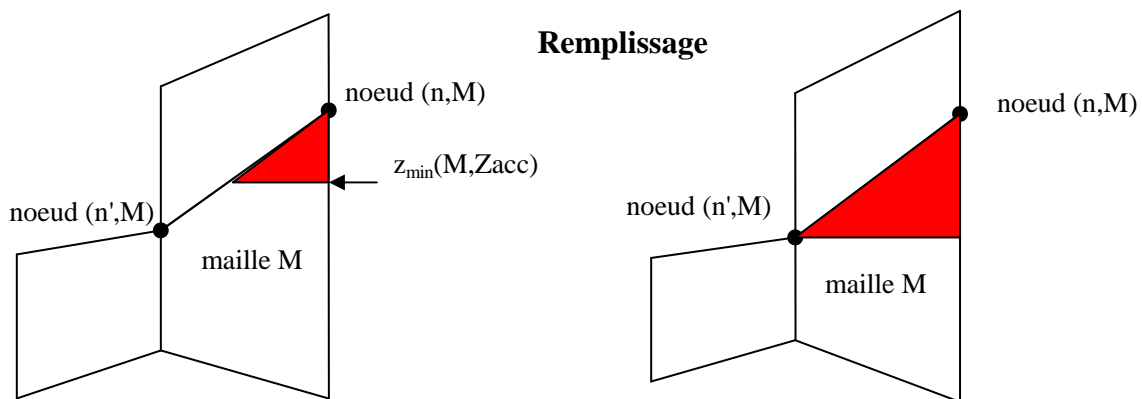


Figure 5.19 : Détail d'une étape de remplissage : la maille est remplie jusqu'au niveau défini par le premier noeud de fuite potentielle rencontré n' .

Définition de $z_{min}(M, Zacc)$:

Lorsqu'une maille M vient d'être percée, on crée une nouvelle zone d'accumulation $Zacc$ contenant M et on initialise $z_{min}(M, Zacc)$ par :

$z_{min}^0(M, Zacc) = z(ntop, M)$ où $z(ntop, M)$ est la cote du noeud le plus haut de la maille M , i.e. la cote la plus basse de la zone d'accumulation.

Puis, au cours des différentes étapes de l'algorithme, la valeur de $z_{\min}(M, Zacc)$ change suivant le ΔP obtenu au cours de l'étape :

Si $\Delta P > 0$:

$$z_{\min}^{k+1}(M, Zacc) = z_{\min}^k(M, Zacc) + \frac{\Delta P}{(\rho_w(M) - \rho_o(M))g}$$

Sinon :

$$z_{\min}^{k+1}(M, Zacc) = z_{\min}^k(M, Zacc)$$

5.3.2.2 Présentation de l'algorithme

L'algorithme suivant permet de vider une source s ayant une quantité d'huile $Qo(s)$.

On se place dans le cas particulier où une source pointe sur une unique maille.

On associe à chaque zone de percolation Zp une source, notée $S(Zp)$, et une tête, notée $T(Zp)$, qui pointe sur une zone d'accumulation cible.

Contrairement à l'algorithme adapté aux maillages structurés, ce sont les zones d'accumulation qui connaissent leur zone de percolation d'origine, et non l'inverse.

On note :

- $Msource$: la maille sur laquelle pointe la source
- $nsource$: le noeud de la maille sur laquelle pointe la source
- $ntop$: le noeud d'une maille M vérifiant : $z(ntop, M) = \underset{n \in M}{Max}(z(n, M))$
- $Zacc^{head}$ avec $k \in [1, nbZacc]$: la zone d'accumulation sur laquelle pointe la tête de Zp

Pour plus de compréhension, on peut résumer schématiquement comment les différents types d'objets utilisés dans l'algorithme (les zones de percolation Zp , les sources S , les têtes T et les zones d'accumulation $Zacc$) sont reliés entre eux à l'aide de la figure 5.20 :

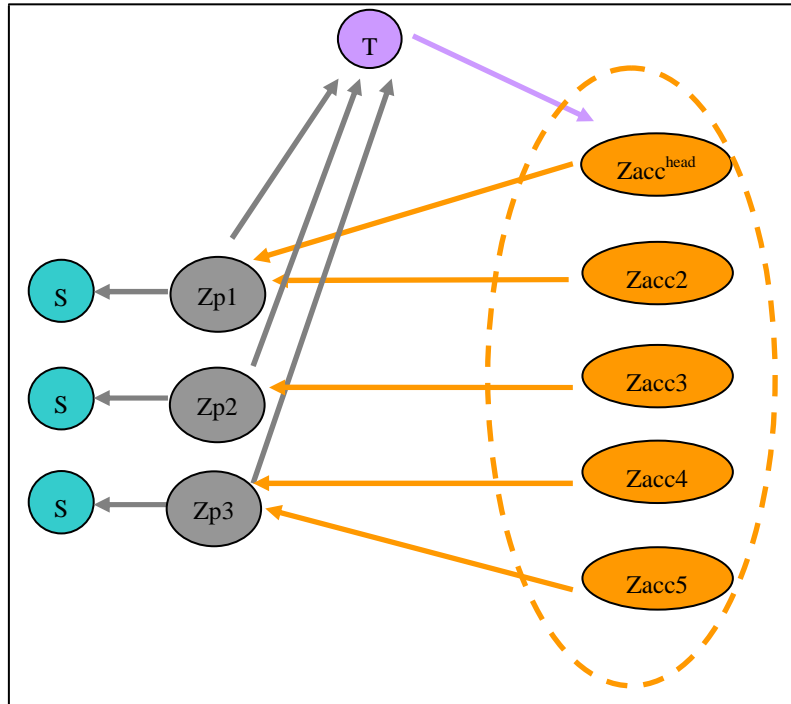


Figure 5.20 : Liens entre les différents objets intervenant dans l'algorithme.

On gère une seule zone de percolation à la fois, correspondant à la source en cours de traitement, mais on peut interférer durant les étapes de migration avec des zones de percolation antérieures.

Algorithme d'invasion percolation adapté aux maillages non structurés :

➤ Initialisations

- ◆ création de $Zacc^0 = \{Msource ; z_{\min}(Msource, Zacc^0) = z(ntop, Msource)\}$
 $Zacc^0$ a pour zone de percolation Zp
- ◆ Zp pointe sur $S(Zp)$ et $T(Zp)$
 où $S(Zp)$ pointe sur $Msource$ et $T(Zp)$ pointe sur $Zacc^{head} = Zacc^0$
- ◆ aller vers le noeud $ntop$ de $Msource$:
 - Si $z(nsource, Msource) = z(ntop, Msource)$ alors $so(Msource) = 0$
 - Sinon $so(Msource) = satex(Msource)$

➤ Tant que $Qo(s) > 0$:

- ◆ Calculer la liste_percee de la zone $Zacc^{head}$:
 $\forall L \in Zacc^{head}$, calculer les $\Delta P(n, L, V)$ où $V \notin Zacc^{head}$ à partir des noeuds n tels que $z(n, L) \geq z_{\min}(L, Zacc^{head})$
- ◆ Calculer la liste_rempl de la zone $Zacc^{head}$:
 $\forall L \in Zacc^{head}$, calculer les $\Delta P(n, L, V)$ à partir des noeuds n tels que $z(n, L) < z_{\min}(L, Zacc^{head})$
- ◆ Trouver $\Delta P_{\min} = Min(\Delta P) = Min(Min(\Delta P_{rempl}), Min(\Delta P_{percee}))$
- ◆ Si $\Delta P_{\min} \leq 0$ et $\Delta P_{\min} \in liste_percee$: **étape de migration** dans une maille M' à partir de son noeud n
 - ne pas mettre à jour les $z_{\min}(L, Zacc^{head})$ où $L \in Zacc^{head}$
 - si M' n'appartient pas à une zone d'accumulation :
 - o création d'une nouvelle zone :
 $Zacc^{k+1} = \{M' ; z_{\min}(M', Zacc^{k+1}) = z(ntop, M')\}$
 $Zacc^{k+1}$ a pour zone de percolation Zp
 - o aller vers le noeud $ntop$ de M' :
 - si $z(n, M') = z(ntop, M')$ alors $so(M') = 0$
 - sinon $so(M') = satex(M')$ et mettre à jour $Qo(s)$
 - o Modification de la zone d'accumulation sur laquelle pointe $T(Zp)$:
 $Zacc^{head} = Zacc^{k+1}$
 - sinon, on note $Zacc^{m'}$ la zone d'accumulation de M' et Zp' la zone de percolation de $Zacc^{m'}$:
 - o si $Zacc^{head} = Zacc^{m'}$
 - la fusion a déjà été faite
 - o sinon
 - mise à jour des têtes sur lesquelles pointent les zones de percolation
 - si $z(n, M') \geq z_{\min}(M', Zacc^{m'})$:
 - essai de fusion de $Zacc^k$ avec $Zacc^{m'}$

- si essai positif, on note $Zacc^{fusion}$ la fusion de $Zacc^k$ avec $Zacc^{m'}$
 - ◊ mettre à jour $z_{\min}(L, Zacc^{fusion}) \quad \forall L \in Zacc^{fusion}$
- sinon (essai négatif de fusion)
 - ◊ si $Zp = Zp'$
 - ✧ Modification de la zone d'accumulation sur laquelle pointe $T(Zp) : Zacc^{head} = Zacc^{m'}$
- sinon
 - si $Zp = Zp'$
 - ◊ Modification de la zone d'accumulation sur laquelle pointe $T(Zp) : Zacc^{head} = Zacc^{m'}$
- enlever ΔP_{\min} de la liste_percee de $Zacc^k$
- ◆ Sinon si $\Delta P_{\min} > 0$ et $\Delta P_{\min} \in liste_percee$: **percée dans une maille M' après accumulation ou suppression dans la maille M de $Zacc^k$**
 - mettre à jour $z_{\min}(L, Zacc^k) \quad \forall L \in Zacc^k$
 - calculer le plan d'huile $\forall L \in Zacc^k$
 - mettre à jour $so(L) \quad \forall L \in Zacc^k$
 - mettre à jour $Qo(s)$
 - si M' n'appartient pas à une zone d'accumulation :
 - o création d'une nouvelle zone :
$$Zacc^{k+1} = \{M'; z_{\min}(M', Zacc^{k+1}) = z(ntop, M')\}$$
 $Zacc^{k+1}$ a pour zone de percolation Zp
 - o aller vers le noeud ntop de M' :
 - si $z(n, M') = z(ntop, M')$ alors $so(M') = 0$
 - sinon $so(M') = satex(M')$ et mettre à jour $Qo(s)$
 - o Modification de la zone d'accumulation sur laquelle pointe $T(Zp) : Zacc^{head} = Zacc^{k+1}$
 - sinon, on note $Zacc^{m'}$ la zone d'accumulation de M' et Zp' la zone de percolation de $Zacc^{m'}$:
 - o si $Zacc^{head} = Zacc^{m'}$
 - la fusion a déjà été faite
 - o sinon
 - mise à jour des têtes sur lesquelles pointent les zones de percolation
 - si $z(n, M') \geq z_{\min}(M', Zacc^{m'})$:
 - essai de fusion de $Zacc^k$ avec $Zacc^{m'}$
 - si essai positif, on note $Zacc^{fusion}$ la fusion de $Zacc^k$ avec $Zacc^{m'}$
 - ◊ mettre à jour $z_{\min}(L, Zacc^{fusion}) \quad \forall L \in Zacc^{fusion}$
 - sinon (essai négatif de fusion)
 - ◊ si $Zp = Zp'$
 - ✧ Modification de la zone d'accumulation sur laquelle pointe $T(Zp) : Zacc^{head} = Zacc^{m'}$
 - sinon

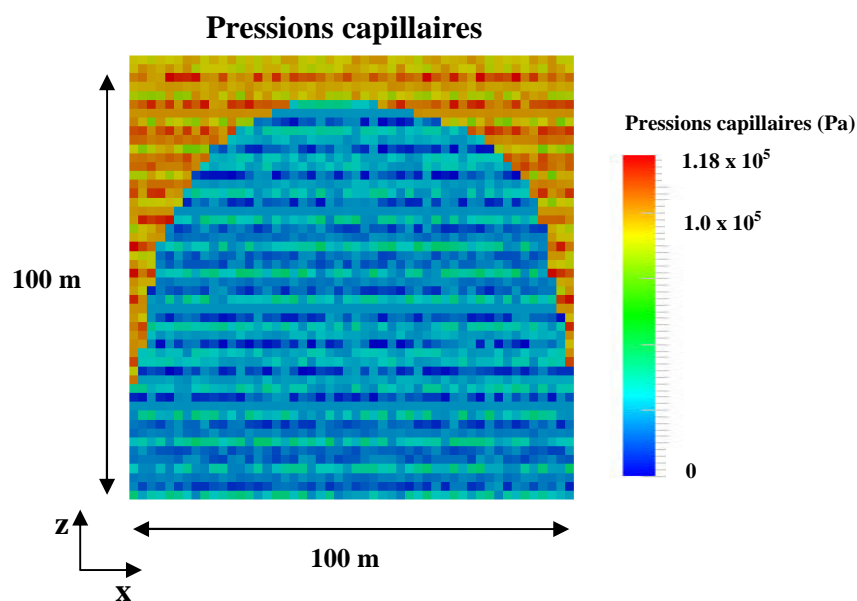
- si $Zp = Zp'$
 - ◊ Modification de la zone d'accumulation sur laquelle
pointe $T(Zp)$: $Zacc^{head} = Zacc^{m'}$
 - enlever ΔP_{min} de la liste_percee de $Zacc^k$
- ◆ Sinon si $\Delta P_{min} \in liste_rempl$: **un nouveau noeud d'une maille M est atteint**
 - mettre à jour $z_{min}(L, Zacc^k) \quad \forall L \in Zacc^k$
 - si $\Delta P_{min} > 0$
 - o calculer le plan d'huile $\forall L \in Zacc^k$
 - o mettre à jour $so(L) \quad \forall L \in Zacc^k$
 - o mettre à jour $Qo(s)$
 - enlever ΔP_{min} de la liste_rempl de $Zacc^k$
 - **remarque1.** Le prochain calcul des listes de $Zacc^k$ contiendra les mailles voisines du nouveau noeud atteint.
 - **remarque2.** $\Delta P_{min} = 0$ correspond au cas d'une maille M avec deux noeuds de même cote.

5.3.3 Résultats

Dans ce paragraphe, nous présentons quelques tests synthétiques réalisés avec un maillage fixe. On ne prend donc pas en compte la compaction. Les sources sont définies dès le début et la quantité d'hydrocarbures qui leur est associée est répartie dans le domaine considéré à l'aide de l'algorithme d'invasion percolation. Des exemples plus complexes et adaptés à la modélisation de bassins sédimentaires en tenant compte notamment de la compaction des sédiments sont présentés dans le chapitre 8.

5.3.3.1 Cas 2D avec un champ de pressions capillaires

Ce cas est une section 2D avec un maillage cartésien composé de 250 mailles. Le champ de pressions capillaires est imposé en entrée (Figure 5.21). Les valeurs de pressions capillaires sont hétérogènes mais suivent deux grandes tendances : des valeurs faibles, proches de 3×10^4 Pa (en bleu sur la figure) et des valeurs fortes, proches de 1×10^5 Pa (en orange sur la figure). La source d'hydrocarbures pointe sur une seule maille (en bas à gauche de la section) et sa quantité associée est égale à 5×10^5 kg. Nous avons utilisé une densité de l'eau ρ_w égale à 1000 kg.m^{-3} , une densité de l'huile ρ_o égale à 800 kg.m^{-3} et la porosité de chaque maille est de 50%. De plus, la saturation irréductible en eau, satir , est égale à 0 et la saturation d'expulsion, satex , est égale à 0.2. Dans ce test, les hydrocarbures subissent uniquement l'influence de la flottabilité et du champ de pressions capillaires.



Les hydrocarbures migrent verticalement depuis la source jusqu'à la barrière capillaire, i.e. la zone à forte valeur de pressions capillaires, tout en formant des micro-accumulations sur le chemin de migration du fait de l'hétérogénéité du champ de pressions capillaires. Une fois la barrière atteinte, les hydrocarbures s'accumulent en dessous de celle-ci. La figure 5.22 illustre les résultats obtenus concernant la saturation d'hydrocarbures et la séquence de remplissage correspondant à l'ordre dans lequel les mailles ont été visitées. Si une maille donnée est visitée plusieurs fois, on retient le numéro de l'étape où elle a été visitée pour la dernière fois.

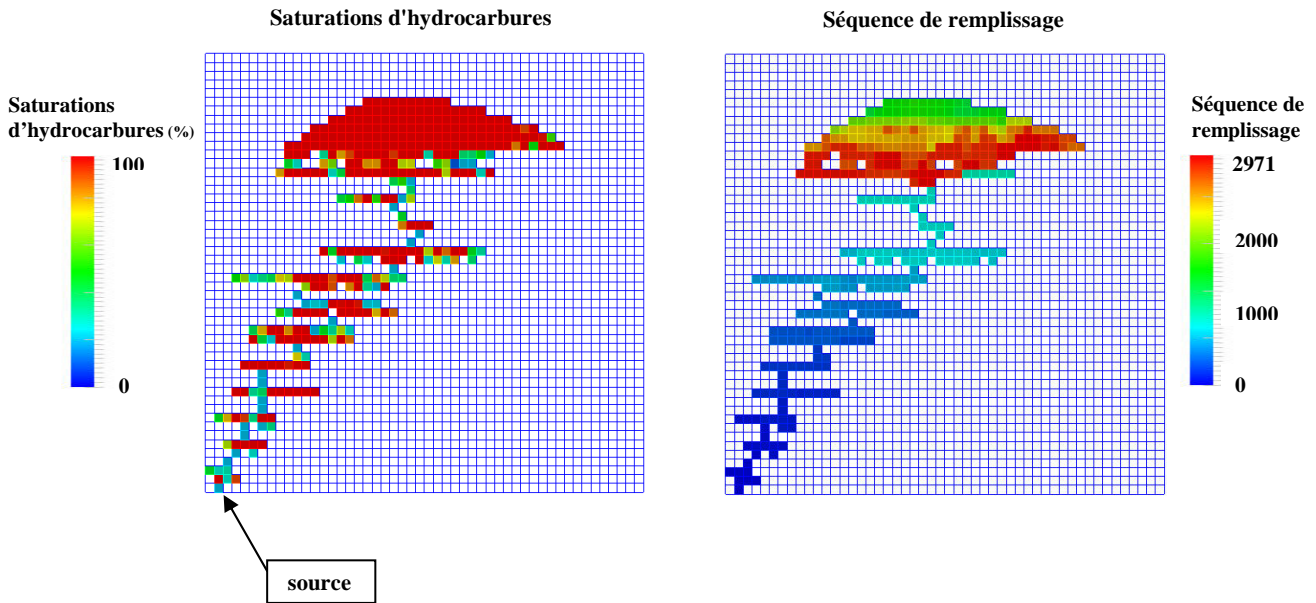


Figure 5.22 : Cas 2D avec un champ de pressions capillaires. Saturation d'hydrocarbures et séquence de remplissage.

5.3.3.2 Cas 3D : une calotte avec un maillage non cartésien.

Ce cas synthétique représente un piège structural idéalisé modélisé par une calotte sphérique. Le domaine est maillé de manière uniforme par un maillage tétraédrique qui contient 1926 mailles. La source d'hydrocarbures pointe sur une seule maille (Figure 5.23) et la quantité d'huile associée est égale à 6×10^8 kg. Nous avons utilisé une densité de l'eau ρ_w égale à 1000 kg.m^{-3} , une densité de l'huile ρ_o égale à 800 kg.m^{-3} et la porosité de chaque maille est de 50%. De plus, la saturation irréductible en eau, sat_{ir} , est égale à 0 et la saturation d'expulsion, sat_{ex} , est égale à 0.2. Dans ce test, comme on n'impose aucun champ de pressions capillaires, les hydrocarbures subissent uniquement l'influence de la flottabilité.

Les hydrocarbures migrent donc verticalement depuis la source jusqu'au toit de la calotte puis s'accumulent jusqu'à ce que la source soit tarie. Les résultats de saturation d'hydrocarbures sont donnés dans la figure 5.23. Ce test permet d'illustrer l'utilisation d'une connectivité par les nœuds et non pas par les faces pour l'algorithme d'invasion percolation. On observe que les mailles accumulées au toit du domaine ont une saturation variable liée au calcul du contact eau/huile par maille.

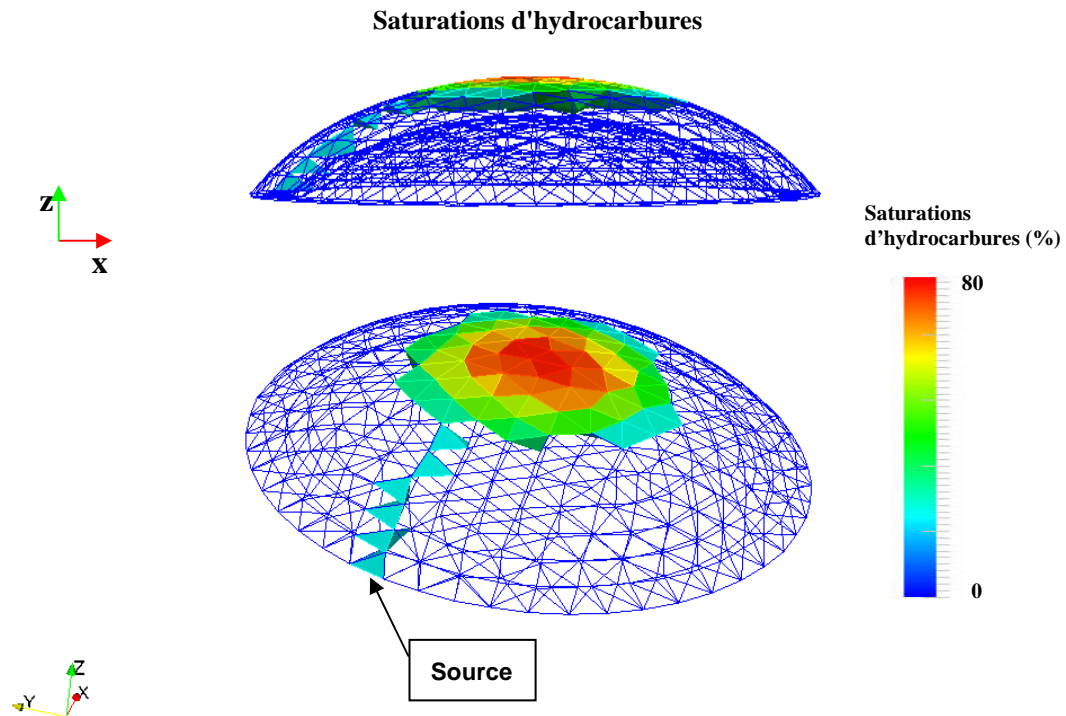


Figure 5.23 : Cas 3D : une calotte avec un maillage non cartésien.
Résultats de saturation d'hydrocarbures vue de profil (en haut) et vue de biais (en bas).

On réalise le même test en ajoutant l'effet de l'hydrodynamisme. Cet effet est simulé en modifiant l'axe du vecteur accélération de la pesanteur sur lequel sont projetés les coordonnées des noeuds au moment de calculer les ΔP . Ceci équivaut à ajouter un champ de pression au champ de pression initial vertical dû à la flottabilité (cf. paragraphe 5.1.2).

La figure 5.24 montre les résultats de saturations d'hydrocarbures. On observe que l'accumulation ne se situe plus au toit du domaine mais est décalée du fait de l'hydrodynamisme.

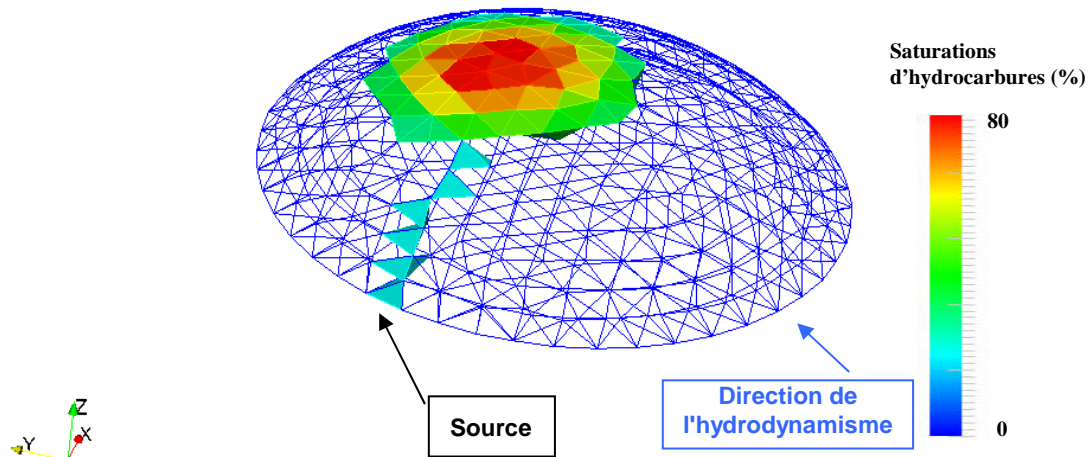


Figure 5.24 : Cas 3D : une calotte avec un maillage non cartésien.
Résultats de saturation d'hydrocarbures en tenant compte d'un hydrodynamisme.

5.3.3.3 Cas 3D avec raffinement de maillage

Le but est de comparer les résultats obtenus sur le même cas test avec des maillages ayant des résolutions différentes. Nous avons positionné deux sources d'hydrocarbures. Pour la première, la quantité d'huile associée est égale à 12×10^{10} kg, pour la deuxième la quantité d'huile est égale à 10×10^{10} kg. Comme pour les cas précédents, nous avons utilisé une densité de l'eau ρ_w égale à 1000 kg.m^{-3} , une densité de l'huile ρ_o égale à 800 kg.m^{-3} et la porosité de chaque maille est de 50%. De plus, la saturation irréductible en eau, s_{wir} , est égale à 0 et la saturation d'expulsion, s_{atex} , est égale à 0.2. La pression d'entrée capillaire est uniformément égale à 0, les hydrocarbures subissent donc uniquement l'influence de la flottabilité.

Le premier maillage est grossier et contient 912 mailles. Le deuxième maillage contient 22800 mailles; ce qui correspond à un raffinement horizontal du premier maillage : chaque maille a été raffinée par 5 suivant les directions x et y.

La figure 5.25 montre les résultats obtenus pour les saturations d'hydrocarbures avec les deux maillages de grille. Dans les deux cas, les sources se vident l'une après l'autre. Pour la première (celle de gauche sur la figure 5.25), les hydrocarbures migrent verticalement jusqu'au point haut du maillage noté 1 sur la figure 5.25, puis ils forment une accumulation, ensuite ils atteignent le point de fuite permettant d'atteindre le point haut 2 et de former une deuxième accumulation d'hydrocarbures. Pour la deuxième source, de la même manière, les hydrocarbures migrent verticalement pour atteindre le plus proche point haut du maillage, noté 3, puis ils forment une accumulation et atteignent le point de fuite permettant de rejoindre l'accumulation 2, initiée par la première source. Au final, on observe qu'une communication de pression s'est établie entre les trois accumulations; elles ne constituent donc plus qu'une seule et unique zone d'accumulation du point de vue de l'algorithme d'invasion percolation.

Avec les deux résolutions de grille, on obtient des résultats comparables. Toutefois, avec la résolution la plus grossière, on laisse davantage d'hydrocarbures sur le chemin de migration qu'avec la résolution plus fine.

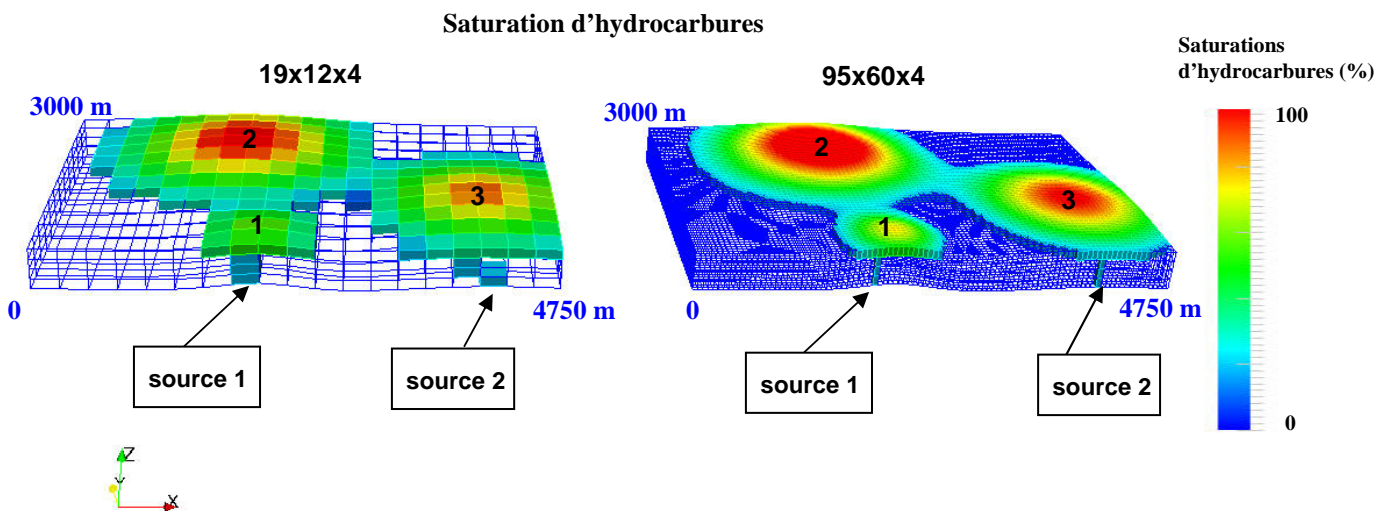


Figure 5.25 : Cas 3D avec raffinement de maillage. Résultats de saturation d'hydrocarbures avec un maillage de faible résolution (à gauche) et un maillage fin (à droite).

5.3.4 Conclusion

L'algorithme d'invasion percolation, que nous avons présenté dans le paragraphe 5.3, permet de faire une migration par les noeuds, d'avoir des plans de contact eau/huile dans chaque maille accumulée et d'avoir des résultats plus précis sur les quantités d'hydrocarbures et les saturations d'huile dans les pièges. La précision du calcul du volume d'hydrocarbures piégés peut encore être augmentée; plusieurs variantes sont proposées dans l'annexe B.

Les premiers tests effectués ont permis de montrer la capacité de l'algorithme à s'appliquer sur différents types de maillages. D'autres résultats obtenus sur des cas d'études réels sont présentés dans le chapitre 8. Dans ce même chapitre, une étude de comparaison permet de montrer les différences entre les modèles de migration, et notamment les conséquences de la non prise en compte de la perméabilité et de la viscosité.