# WTNP120 - Apparition/disparition de phase dans un écoulement diphasique : Injection de gaz dans un barreau saturé en eau pure

**Résumé :**

Ce test représente la simulation de l'injection de gaz dans un milieu géologique saturé.

Il s'agit de modéliser et de simuler l'apparition du gaz et l'évolution d'un écoulement diphasique eau/hydrogène dans un milieu poreux initialement saturé en eau pure. On considère une situation « quasi »-1D où les effets de la gravité sont négligés. Le cas test est présenté dans une configuration 2D mais il peut être traité de manière équivalente comme un problème 1D.

Il s'agit d'un calcul purement hydraulique miscible. La géométrie représentée correspond à un barreau. Les termes de transfert sont décrits par un modèle de Mualem Van-Genuchten. Le problème est traité par les différents schémas disponibles pour la modélisation des écoulements diphasiques : les éléments finis classiques, les Volumes Finis Décentrés Arête, les Volumes Finis Décentrés Maille et les Volumes Finis Centrés Maille.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 1 Problème de référence

## 1.1 Géométrie

Le domaine est un barreau de taille $[0\text{m},200\,m]\times[0\text{m},1\text{m}]$ :




## 1.2 Propriétés des matériaux

On ne donne ici que les propriétés dont la solution dépend, sachant que le fichier de commandes contient d'autres données de matériau qui ne jouent aucun rôle dans la solution du problème traité.

| | | |
|---|---|---|
| Eau liquide | Masse volumique $(kg.m^{-3})$ | $1000$ |
| | Masse molaire $(kg.mol^{-1})$ | $10^{-2}$ |
| | Viscosité $(kg.m^{-1}.s^{-1})$ | $10^{-3}$ |
| Gaz | Masse volumique $(kg.m^{-3})$ | $810^{-2}$ |
| | Masse molaire $(kg.mol^{-1})$ | $210^{-3}$ |
| | Viscosité $(kg.m^{-1}.s^{-1})$ | $910^{-5}$ |
| Gaz dissous | Coefficient de Henry $(Pa.mol^{-1}.m^{3})$ | $130719$ |
| Vapeur | Masse volumique $(kg.m^{-3})$ | $10^{-4}$ |
| Paramètres homogénéisés | Perméabilité k $(m^{2})$ | $510^{-20}$ |
| | Porosité | $0.15$ |
| | Fick gaz $(m^{2}.s^{-1})$ | $0$ |
| | Fick liquide $(m^{2}.s^{-1})$ | $0,4510^{-9}$ |
| Paramètres de Van-Genuchten | $N$ | $1,49$ |
| | $P_r$ $(MPa)$ | $2$ |
| | $S_{rl}$ | $0,4$ |
| | $S_{gr}$ | $0$ |
| | $Smax$ | $0,999$ |
| État initial | Pression capillaire $(Pa)$ | $P_c^0 = -10^{-6}$ |
| | Pression de gaz $(Pa)$ | $Pgz = 0$ |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les courbes de saturation et de perméabilités obéissent au modèle Mualem-Van-Genuchten (HYDR_VGM). Il faut donc définir dans les matériaux les paramètres $n$, $Pr$, $Sr$, $Smax$.

On rappelle que ces modèles sont :

$$S_{le}=\frac{S_l-S_{lr}}{1-S_{lr}} \text{ et } m=1-\frac{1}{n}$$

$$S_{we}=\frac{1}{\left[1+\left(\frac{P_c}{P_r}\right)^n\right]^m}$$

La perméabilité relative à l'eau s'exprime en intégrant le modèle de prédiction proposé par Mualem (1976) dans le modèle de capillarité de Van Genuchten.

$$k_r^g=\sqrt{(1-S_{le})}(1-S_{le}^{\frac{1}{m}})^{2m} \quad k_r^l=\sqrt{S_{le}}(1-(1-S_{le}^{\frac{1}{m}})^m)^2$$

La perméabilité au gaz est formulée de façon similaire :

$$k_r^w=\sqrt{(1-S_{we})}(1-S_{we}^{1/m})^{2\mathrm{m}}$$

On rappelle que pour $S>Smax$, ces courbes sont interpolées par un polynôme de degré 2 $C1$ en $Smax$.

## 1.3 Conditions aux limites et initiales

Les conditions limites sont les suivantes :

- des conditions de Neumann sur le haut et le bas du domaine :

$$(F_l^w+F_g^w)\cdot n=0$$
$$(F_l^c+F_g^c)\cdot n=0$$

- des conditions de Neumann sur la partie gauche du domaine :

Si $0<t<TSIM$ alors $(F_l^w+F_g^w)\cdot n=0$

Si $0<t<TINJ$ alors $(F_l^c+F_g^c)\cdot n=Q$

Si $TINJ<t<TSIM$ alors $(F_l^c+F_g^c)\cdot n=0$

- des conditions de Dirichlet sur la partie droite du domaine :

$$P_l(x=200,y,t)=10^{-6}\,Pa$$
$$P_g(x=200,y,t)=0\,Pa$$

Les conditions initiales sont les suivantes :

$$P_l(x,y,t=0)=10^{-6}\,Pa$$
$$P_g(x,y,t=0)=0\,Pa$$

Le flux d'hydrogène imposée sur la partie gauche, $Q$, vaut :

$$Q=1{,}76.10^{-13}\,kg/m^2\,s$$

Le temps d'injection, $TINJ$ est de $5.10^5\,ans$ et le temps de simulation est de $10^6\,ans$,



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

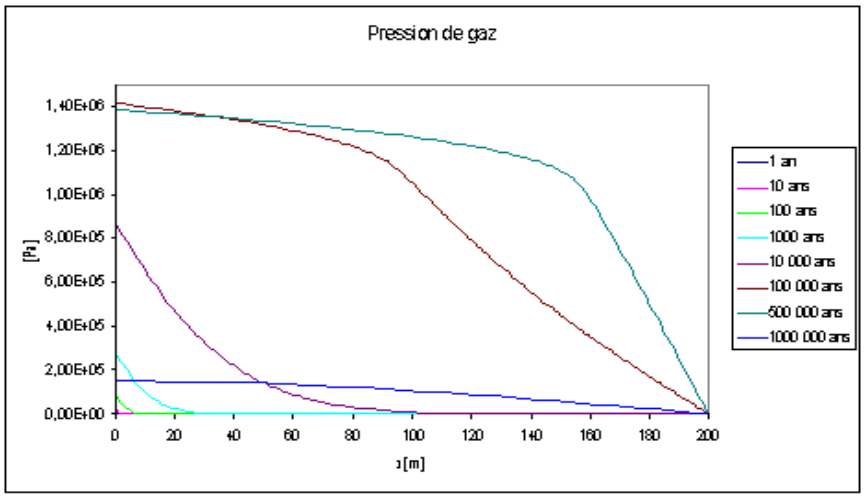
# 2 Modélisation A

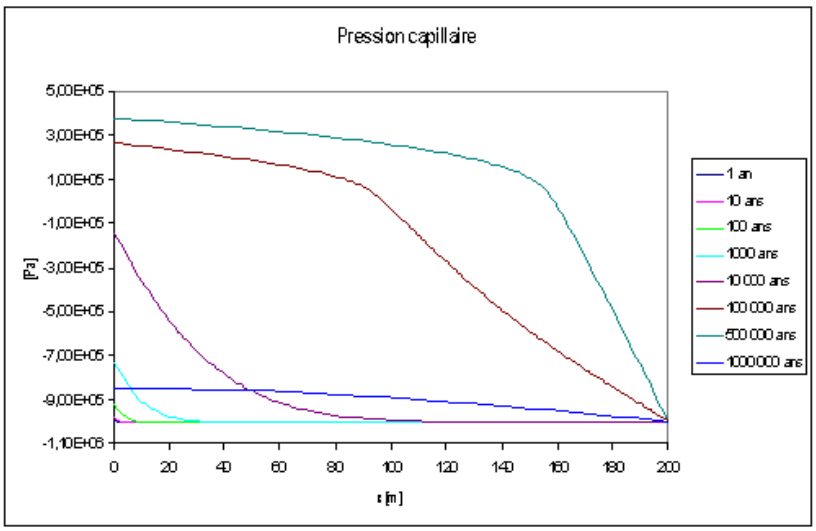
## 2.1 Caractéristiques de la modélisation A

Modélisation D_PLAN_HH2SUDA, cette modélisation correspond à la modélisation Volume Finis Décentrés Arête (VFDA). Couplage LIQU_AD_GAZ. On utilise un maillage composé de 200 éléments QUAD8.

## 2.2 Résultats

On trace les profils de pression de gaz et et de pressions capillaires à différents temps :




On constate que la pression de gaz augmente jusqu'à 100 000 ans puis décroît. On constate également que le gaz se diffuse dans le domaine au cours du temps.

On constate que l'on commence à désaturer à partir de 100 000 ans (lorsque la pression capillaire devient positive). Cela signifie que le gaz n'est d'abord transporté que par dissolution/diffusion.
Les résultats sont ceux que nous attendions.

## 2.3 Valeurs testées



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Ce cas test n'a pas de valeur de référence, on en fait donc un cas de non régression.

On effectue des tests sur 6 valeurs :

| **Points** $(x, y)$ | **Temps ( $s$ )** | **PRE1 *Aster*** |
|---|---|---|
| $(0{,}5\,;0)$ | 1 an | -9,98E+005 |
| | 1000 ans | -7,34E+005 |
| $(0{,}5\,;0{,}5)$ | 1 an | -9,97E+005 |
| | 1000 ans | -7,34E+005 |
| $(99{,}5\,;0)$ | 1 an | -9,99E+005 |
| | 1000 ans | -1,01E+006 |
| $(99{,}5\,;0{,}5)$ | 1 an | -9,99E+005 |
| | 1000 ans | -1,00E+006 |
| $(190{,}5\,;0)$ | 1 an | -9,99E+005 |
| | 1000 ans | -1,00E+006 |
| $(190{,}5\,;0{,}5)$ | 1 an | -9,99E+005 |
| | 1000 ans | -1,00E+006 |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 3 Modélisation B

## 3.1 Caractéristiques de la modélisation B

Modélisation D_PLAN_HH2S. Cette modélisation correspond à la modélisation Éléments Finis classiques. Couplage LIQU_AD_GAZ. On utilise un maillage composé de 200 éléments QUAD8.

## 3.2 Résultats

Les résultats sont identiques à ceux obtenus avec la modélisation volumes finis décentrés sur l'arête (Modélisation A).

## 3.3 Valeurs testées

Ce cas test n'a pas de valeur de référence, on en fait donc un cas de non régression.

On effectue des tests sur 6 valeurs :

| **Points** $(x, y)$ | **Temps ( $s$ )** | **PRE1 *Aster*** |
|---|---|---|
| $0$ | 1 an | -9,95E+005 |
| | 1000 ans | -7,22E+005 |
| $(100,0)$ | 1 an | -9,99E+005 |
| | 1000 ans | -1,00E+006 |
| $(190,0)$ | 1 an | -9,99E+005 |
| | 1000 ans | -1,00E+006 |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 4 Modélisation C

## 4.1 Caractéristiques de la modélisation C

Modélisation 3D_HH2SUDA. Cette modélisation correspond à la modélisation Volumes Finis Décentrés Arête (VFDA). Couplage LIQU_AD_GAZ. On utilise un maillage composé de 502 éléments HEXA27.

## 4.2 Résultats

Les résultats sont très proches de ceux obtenus avec la modélisation volumes finis décentrés sur l'arête (Modélisation A).

## 4.3 Valeurs testées

Ce cas test n'a pas de valeur de référence, on en fait donc un cas de non régression.

On effectue des tests sur 6 valeurs :

| **Points** $(x, y)$ | **Temps (** $s$ **)** | **PRE1** ***Aster*** | **PRE2** ***Aster*** |
|---|---|---|---|
| $(-49{,}5\,;0{,}5\,;0)$ *NH4* | 1 an | -9,96E+005 | 1,19E+003 |
| | 1000 ans | -7,46E+005 | 2,55E+005 |
| $(-1{,}5\,;0\,;-0{,}5)$ *NH195* | 1 an | -9,99E+005 | 4,96E-011 |
| | 1000 ans | -1,00E+006 | 9,40E-006 |
| $(-49{,}5\,;0\,;0{,}5)$ *NH1* | 1 an | -9,99E+005 | 1,19E+003 |
| | 1000 ans | -7,46E+005 | 2,55E+005 |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 5 Modélisation D

## 5.1 Caractéristiques de la modélisation D

Modélisation 3D_HH2S. Cette modélisation correspond à la modélisation Éléments Finis. Couplage LIQU_AD_GAZ. On utilise un maillage composé de 100 éléments HEXA20.

## 5.2 Résultats

Les résultats sont identiques à ceux obtenus avec la modélisation volumes finis décentrés sur l'arête (Modélisation A).

## 5.3 Valeurs testées

Ce cas test n'a pas de valeur de référence, on en fait donc un cas de non régression.

On effectue des tests sur 6 valeurs :

| **Points** $(x, y)$ | **Temps (** $s$ **)** | **PRE1** ***Aster*** | **PRE2** ***Aster*** |
|---|---|---|---|
| $(-49\ ;-0,5\ ;0,5)$ *N6* | 1 an | -9,99E+005 | 2,168E+003 |
| | 1000 ans | -7,45E+005 | 2,55E+005 |
| $(-47\ ;-0,5\ ;0,5)$ *N16* | 1 an | -1,00E+006 | 2,322E-001 |
| | 1000 ans | -7,91E+006 | 2,10E+005 |
| $(-48\ ;-0,5\ ;-0,5)$ *N716* | 1 an | -1,00E+006 | 7,86 |
| | 1000 ans | -7,69E+005 | 2,32E+005 |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 6 Modélisation E

## 6.1 Caractéristiques de la modélisation E

Modélisation 3D_HH2MS. Cette modélisation correspond à la modélisation Eléments Finis et a juste pour but de tester la modélisation 3D_HHMS avec flux imposé. Les déplacements sont bloqués sur les bords du domaine. Couplage LIQU_AD_GAZ. On utilise un maillage composé de 100 éléments HEXA20.

## 6.2 Résultats

Les résultats sont identiques à ceux obtenus avec la modélisation volumes finis décentrés sur l'arête (Modélisation A).

## 6.3 Valeurs testées

Ce cas test n'a pas de valeur de référence, on en fait donc un cas de non régression.

On effectue des tests sur 6 valeurs :

| **Points** $(x, y)$ | **Temps (** $s$ **)** | **PRE1 *Aster*** | **PRE2 *Aster*** |
|---|---|---|---|
| $(-49\ ;-0,5\ ;0,5)$ *N6* | 1 an | -9,99E+005 | 2,168E+003 |
| | 1000 ans | -7,45E+005 | 2,55E+005 |
| $(-47\ ;-0,5\ ;0,5)$ *N16* | 1 an | -1,00E+006 | 2,322E-001 |
| | 1000 ans | -7,91E+006 | 2,10E+005 |
| $(-48\ ;-0,5\ ;-0,5)$ *N716* | 1 an | -1,00E+006 | 7,86 |
| | 1000 ans | -7,69E+005 | 2,32E+005 |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 7 Modélisation F

## 7.1 Caractéristiques de la modélisation F

Modélisation 3D_HH2MD. Cette modélisation correspond à la modélisation Eléments Finis et a juste pour but de tester la modélisation 3D_HHMD avec flux imposé. Les déplacements sont bloqués sur les bords du domaine. Couplage LIQU_AD_GAZ. On utilise un maillage composé de 100 éléments HEXA20.

## 7.2 Résultats

Les résultats sont identiques à ceux obtenus avec la modélisation volumes finis décentrés sur l'arête (Modélisation A).

## 7.3 Valeurs testées

Ce cas test n'a pas de valeur de référence, on en fait donc un cas de non régression.

On effectue des tests sur 6 valeurs :

| **Points** $(x, y)$ | **Temps (** $s$ **)** | **PRE1** ***Aster*** | **PRE2** ***Aster*** |
|---|---|---|---|
| $(-49\ ;-0,5\ ;0,5)$ *N6* | 1 an | -9,99E+005 | 2,168E+003 |
| | 1000 ans | -7,45E+005 | 2,55E+005 |
| $(-47\ ;-0,5\ ;0,5)$ *N16* | 1 an | -1,00E+006 | 2,322E-001 |
| | 1000 ans | -7,91E+006 | 2,10E+005 |
| $(-48\ ;-0,5\ ;-0,5)$ *N716* | 1 an | -1,00E+006 | 7,86 |
| | 1000 ans | -7,69E+005 | 2,32E+005 |



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

# 8 Synthèse des résultats

Ce test permet de reproduire un cas classique de la littérature et de la modélisation du stockage : l'injection de gaz dans un milieu saturé. Nous ne disposons pas de solutions de référence précises auxquelles nous comparer, cependant les valeurs et l'allure des résultats sont conformes à celles de la littérature. Nous en faisons donc un cas test de non régression.

Ce cas test permet de tester les différents schémas disponibles pour la modélisation des écoulements diphasiques en 2D et en 3D :

- Les éléments finis classiques
- Les Volumes Finis Décentrés Arête (modélisation * `_HH2SUDA)`

Ces schémas donnent tous des résultats très proches. En termes de performance et de fiabilité.



Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)