

Présentation des cas tests diphasiques

Modélisation des écoulements diphasiques liquide-gaz en milieu poreux

Farid Smaï

IRSN, UCBL, ICJ

23 Septembre 2010



- ▶ Des cas tests sur les écoulements liquide-gaz pour :
 - isoler et comprendre des configurations "simples"
 - pouvoir comparer les différences de modélisation
 - comparer les méthodes numériques

- ▶ *[http ://sources.univ-lyon1.fr/cas_test.html](http://sources.univ-lyon1.fr/cas_test.html)*

Modélisation des écoulements diphasiques liquide-gaz en milieu poreux

- Hypothèses physiques générales
- Hypothèses physiques spécifiques
- Hypothèses physiques simplificatrices
- Les équations constitutives

Les cas tests

- I.a : Injection dans un matériau homogène saturé en liquide
- I.b : Injection dans un matériau homogène non saturé
- II.a : Injection dans un matériau non homogène
- II.b : Injection dans un matériau non homogène saturé en liquide
- III.a : Déséquilibre de pressions dans un matériau homogène
- III.b : Déséquilibre de pressions dans un matériau homogène partiellement saturé
- IV : Déséquilibre de pressions dans un matériau non homogène (immiscible)
- V : Injection dans un matériau non homogène (2D)

Modélisation

Hypothèses générales

- ▶ 2 phases : liquide et gaz
- ▶ 2 composants : eau et 1 composant gazeux
- ▶ Conservation de la masse pour chaque composant
- ▶ Loi de Darcy généralisée pour l'écoulement de chaque phase
- ▶ Loi de pression capillaire : $p_g - p_l = p_c$
- ▶ Loi des gaz parfaits
- ▶ Ecoulement isotherme
- ▶ Pas de réactions chimiques

Modélisation

Hypothèses spécifiques

Mécanique de la matrice poreuse

- indéformable : $\Phi = Cst$
- déformable : $\partial\Phi/\partial t = \alpha\partial P_l/\partial t$

Composition des phases

- phases immiscibles : 1 composant par phase
- phases miscibles : n composants par phase
 - ▶ Diffusion des composants dans chaque phase
 - ▶ Equilibre thermodynamique entre la solution liquide et le mélange gazeux

Modélisation

Hypothèses simplificatrices

- ▶ Loi de pression capillaire "univoque" : $P_c = f(S_l)$
- ▶ Pas de vapeur d'eau : $P_v^w \equiv 0$
- ▶ Diffusion de l'eau dans le liquide négligeable : $D_l^w \equiv 0$
- ▶ Phase liquide incompressible : $\left(\frac{\partial \rho_l}{\partial P_l} \right)_{T, N_l^i} \equiv 0$

Modélisation

Les équations constitutives : Phases en milieu poreux et composition

- Répartition des phases dans la matrice poreuse : $S_l + S_g = 1$

- Composition d'une phase non pure (cas miscible)

- ▶ Concentration molaire : c_α^i
- ▶ Concentration molaire de la phase : $c_\alpha = \sum_i c_\alpha^i$
- ▶ Densité massique : $\rho_\alpha^i = M^i c_\alpha^i$
- ▶ Densité massique de la phase : $\rho_\alpha = \sum_i \rho_\alpha^i$
- ▶ Fraction molaire : $x_\alpha^i = c_\alpha^i / c_\alpha$
- ▶ Volume molaire partiel : $\sum_i v_\alpha^i x_\alpha^i = 1 / c_\alpha$

$$\left[v_\alpha^i \equiv \left(\frac{\partial V_\alpha}{\partial N_\alpha^i} \right)_{T, P_\alpha, N_\alpha^j, j \neq i} \right]$$

▶ Incompressibilité du liquide ?

- $\rho_l = Cste$
- $\rho_l^w = Cste$
- $v_l^i = Cste$

Modélisation

Les équations constitutives : Transports et conservation de la masse

- Ecoulement des phases : loi de Darcy généralisée

$$\mathbf{q}_\alpha = -\mathbb{K} \frac{k_{r,\alpha}(S_\alpha)}{\mu_\alpha} (\nabla P_\alpha - \rho_\alpha \mathbf{g})$$

- Flux diffusif (cas miscible) : lois de Fick

$$\mathbf{j}_\alpha^i = -\Phi S_\alpha M^i c_\alpha D_\alpha^i \nabla x_\alpha^i$$

$$\mathbf{j}_\alpha^i = -\Phi S_\alpha \rho_\alpha D_\alpha^i \nabla y_\alpha^i$$

- Conservation de la masse pour chaque composant

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Phi S_l \rho_l^i + \Phi S_g \rho_g^i) + \operatorname{div} (\phi^i) = \mathcal{F}^i$$

Flux total du composant i : $\phi^i = \rho_l^i \mathbf{q}_l + \rho_g^i \mathbf{q}_g + \mathbf{j}_l^i + \mathbf{j}_g^i$

Modélisation

Les équations constitutives : Equation d'état de la phase gaz

Loi des gaz parfaits : $P_g = c_g RT$

Mélange idéal de gaz parfaits (cas miscible)

- ▶ Pressions partielles : $P_g^i = x_g^i P_g$ ($\sum_i P_g^i = P_g$)
- ▶ Loi de Dalton : $P_g^i = c_g^i RT$
 - ▶ volumes molaires partiels : $v_g^i = \frac{RT}{P_g}$

Modélisation

Les équations constitutives : Equilibre thermodynamique entre les phases (cas miscible)

- Hypothèses :
- mélange idéal de gaz parfait
 - "composants gazeux" peu solubles
 - liquide incompressible
 - pas de réactions chimiques

o Loi de Raoult et Loi de Henry

▶ loi de Raoult : $P_g^w = P_v^w x_l^w$

▶ loi de Henry : $M^i H^i P_g^i = \rho_l^i$ ou $P_g^i = K_H^i x_l^i$ $\left(H^i = \frac{\rho_l^w}{M^w} \frac{1}{K_H^i} \right)$

o loi de Raoult-Kelvin : $P_g^w = P_v^w \exp\left(-\frac{M^w P_c}{RT \rho_l}\right) x_l^w$

o Cas général

▶ $P_g^w = P_v^w \exp\left(\frac{P_l - P_v^w}{RT/v_l^w}\right) x_l^w$

▶ $P_g^i = K_H^i \exp\left(\frac{P_l - P^0}{RT/v_l^i}\right) x_l^i$

I.a

I.b

II.a

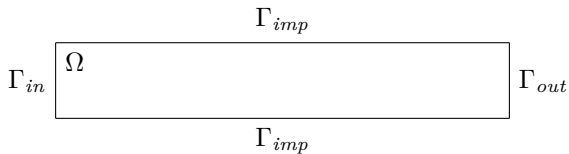
II.b

III.a

III.b

IV

V

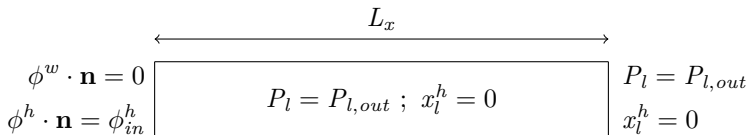


Cas tests

I.a : Injection dans un matériau homogène saturé en liquide

Cas tests

I.a : Injection dans un matériau homogène saturé en liquide



Milieu poreux			Caractéristiques des fluides		
k	$5 \cdot 10^{-20}$	m^2	D_l^h	$3 \cdot 10^{-9}$	m^2/s
Φ	0.15	(-)	μ_l	$1 \cdot 10^{-3}$	$Pa \cdot s$
P_r	$2 \cdot 10^6$	Pa	μ_g	$9 \cdot 10^{-6}$	$Pa \cdot s$
n	1.49	(-)	H^h	$7.65 \cdot 10^{-6}$	$mol/Pa/m^3$
S_{lr}	0.4	(-)	M^w	10^{-2}	kg/mol
S_{gr}	0	(-)	M^h	$2 \cdot 10^{-3}$	kg/mol
			ρ_l^{std}	10^3	kg/m^3
			T	303	K

L_x	200	m
Q^h	5.57	$mg/m^2/ans$
$P_{l,out}$	10^6	Pa
T_{inj}	$5 \cdot 10^5$	ans
T_{simul}	10^6	ans

$$\phi_{in}^h = Q^h \mathbf{1}_{[0, T_{inj}]}(t)$$

$$p_c = P_r \left(S_{le}^{-1/m} - 1 \right)^{1/n}, \quad kr_l = \sqrt{S_{le}} \left(1 - (1 - S_{le}^{1/m})^m \right)^2 \quad \text{et} \quad kr_g = \sqrt{1 - S_{le}} \left(1 - S_{le}^{1/m} \right)^{2m}$$

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

I.a

I.b

II.a

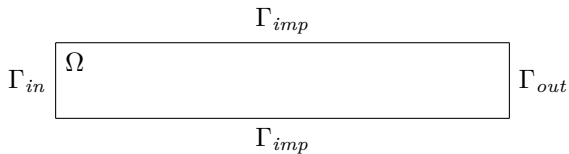
II.b

III.a

III.b

IV

V



Cas tests

I.b : Injection dans un matériau homogène non saturé

Cas tests

I.b : Injection dans un matériau homogène non saturé

$$\begin{array}{c}
 \xleftarrow{L_x} \hspace{10em} \xrightarrow{\hspace{10em}} \\
 \phi^w \cdot \mathbf{n} = 0 \\
 \phi^h \cdot \mathbf{n} = \phi_{in}^h
 \end{array}
 \quad
 \boxed{
 \begin{array}{c}
 P_l = P_{l,out} ; P_g = P_{g,out} \\
 P_l = P_{l,out} \\
 P_g = P_{g,out}
 \end{array}
 }$$

Milieu poreux			Caractéristiques des fluides		
k	$5 \cdot 10^{-20}$	m^2	D_l^h	$3 \cdot 10^{-9}$	m^2/s
Φ	0.15	(-)	μ_l	$1 \cdot 10^{-3}$	$Pa \cdot s$
P_r	$2 \cdot 10^6$	Pa	μ_g	$9 \cdot 10^{-6}$	$Pa \cdot s$
n	1.49	(-)	H^h	$7.65 \cdot 10^{-6}$	$mol/Pa/m^3$
S_{lr}	0.4	(-)	M^w	10^{-2}	kg/mol
S_{gr}	0	(-)	M^h	$2 \cdot 10^{-3}$	kg/mol
			ρ_l^{std}	10^3	kg/m^3
			T	303	K

L_x	200	m
Q^h	55.7	$mg/m^2/ans$
$P_{l,out}$	10^6	Pa
$P_{g,out}$	$1.1 \cdot 10^6$	Pa
T_{simul}	10^6	ans

$$p_c = P_r \left(S_{le}^{-1/m} - 1 \right)^{1/n}, \quad kr_l = \sqrt{S_{le}} \left(1 - (1 - S_{le}^{1/m})^m \right)^2 \quad \text{et} \quad kr_g = \sqrt{1 - S_{le}} \left(1 - S_{le}^{1/m} \right)^{2m}$$

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

I.a

I.b

II.a

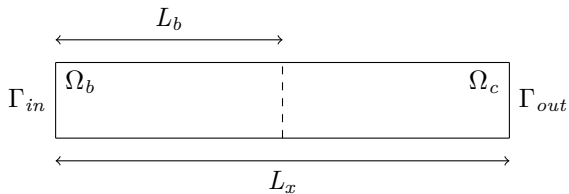
II.b

III.a

III.b

IV

V

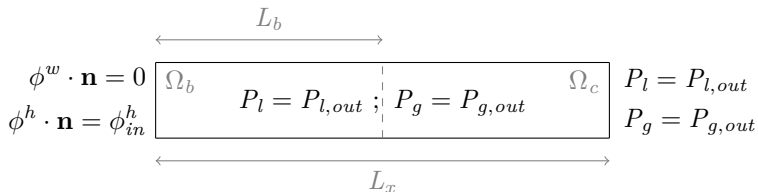


Cas tests

II.a : Injection dans un matériau non homogène

Cas tests

II.a : Injection dans un matériau non homogène



Milieu poreux				Caractéristiques des fluides		
	Ω_b	Ω_c				
k	10^{-18}	$5 \cdot 10^{-20}$	m^2	D_l^h	$3 \cdot 10^{-9}$	m^2/s
Φ	0.3	0.15	(-)	μ_l	$1 \cdot 10^{-3}$	$Pa \cdot s$
P_r	$2 \cdot 10^6$	$15 \cdot 10^6$	Pa	μ_g	$9 \cdot 10^{-6}$	$Pa \cdot s$
n	1.54	1.49	(-)	H	$7.65 \cdot 10^{-6}$	$mol/Pa/m^3$
S_{lr}	0.01	0.4	(-)	M^w	10^{-2}	kg/mol
S_{gr}	0	0	(-)	M^h	$2 \cdot 10^{-3}$	kg/mol
				ρ_l^{std}	10^3	kg/m^3
				T^l	303	K

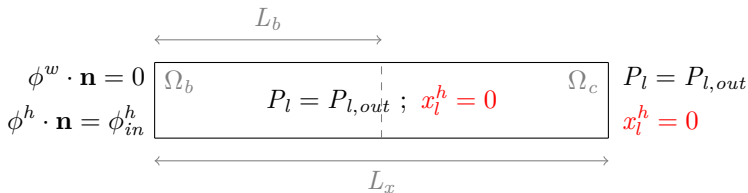
L_x	200	m
L_b	20	m
Q^h	55.7	$mg/m^2/ans$
$P_{l,out}$	10^6	Pa
$P_{g,out}$	$1.5 \cdot 10^6$	Pa
T_{simul}	10^6	ans

$$p_c = P_r \left(S_{le}^{-1/m} - 1 \right)^{1/n}, \quad kr_l = \sqrt{S_{le}} \left(1 - (1 - S_{le}^{1/m})^m \right)^2 \quad \text{et} \quad kr_g = \sqrt{1 - S_{le}} \left(1 - S_{le}^{1/m} \right)^{2m}$$

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

Cas tests

II.b : Injection dans un matériau non homogène saturé en liquide

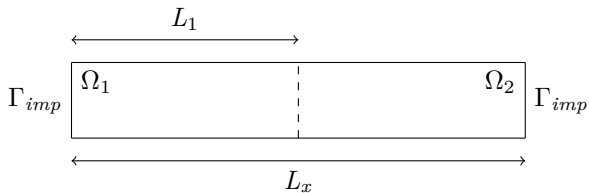


	Milieu poreux			Caractéristiques des fluides		
	Ω_b	Ω_c				
k	10^{-18}	$5 \cdot 10^{-20}$	m^2	D_l^h	$3 \cdot 10^{-9}$	m^2/s
Φ	0.3	0.15	(-)	μ_l	$1 \cdot 10^{-3}$	$Pa \cdot s$
P_r	$2 \cdot 10^6$	$15 \cdot 10^6$	Pa	μ_g	$9 \cdot 10^{-6}$	$Pa \cdot s$
n	1.54	1.49	(-)	H	$7.65 \cdot 10^{-6}$	$mol/Pa/m^3$
S_{lr}	0.01	0.4	(-)	M^w	10^{-2}	kg/mol
S_{gr}	0	0	(-)	M^h	$2 \cdot 10^{-3}$	kg/mol
				ρ_l^{std}	10^3	kg/m^3
				T^l	303	K

L_x	200	m
L_b	20	m
Q^h	55.7	$mg/m^2/ans$
$P_{l,out}$	10^6	Pa
T_{simul}	10^6	ans

$$p_c = P_r \left(S_{le}^{-1/m} - 1 \right)^{1/n}, \quad kr_l = \sqrt{S_{le}} \left(1 - (1 - S_{le}^{1/m})^m \right)^2 \quad \text{et} \quad kr_g = \sqrt{1 - S_{le}} \left(1 - S_{le}^{1/m} \right)^{2m}$$

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

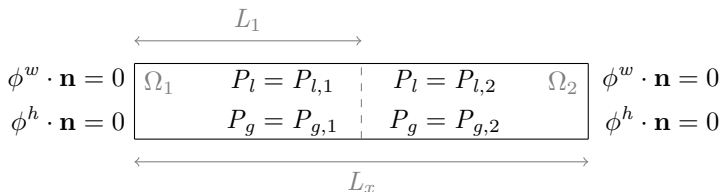


Cas tests

III.a : Déséquilibre de pressions dans un matériau homogène

Cas tests

III.a : Déséquilibre de pressions dans un matériau homogène



Milieu poreux			Caractéristiques des fluides		
k	10^{-16}	m^2	D_l^h	$3 \cdot 10^{-9}$	m^2/s
Φ	0.3	(-)	μ_l	$1 \cdot 10^{-3}$	$Pa \cdot s$
P_r	$2 \cdot 10^6$	Pa	μ_g	$9 \cdot 10^{-6}$	$Pa \cdot s$
n	1.54	(-)	H^h	$7.65 \cdot 10^{-6}$	$mol/Pa/m^3$
S_{lr}	0.01	(-)	M^w	10^{-2}	kg/mol
S_{gr}	0	(-)	M^h	$2 \cdot 10^{-3}$	kg/mol
			ρ_l^{std}	10^3	kg/m^3
			T	303	K

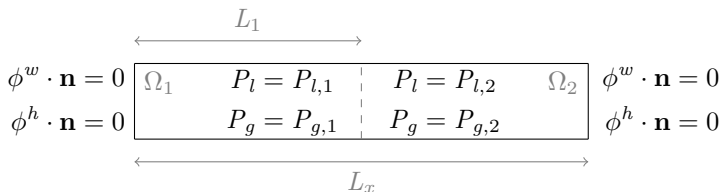
L_x	1	m
L_1	0.5	m
$P_{l,1}$	10^6	Pa
$P_{g,1}$	$1.5 \cdot 10^6$	Pa
$P_{l,2}$	10^6	Pa
$P_{g,2}$	$2.5 \cdot 10^6$	Pa
T_{simul}	10^6	s

$$p_c = P_r \left(S_{le}^{-1/m} - 1 \right)^{1/n}, \quad kr_l = \sqrt{S_{le}} \left(1 - (1 - S_{le}^{1/m})^m \right)^2 \quad \text{et} \quad kr_g = \sqrt{1 - S_{le}} \left(1 - S_{le}^{1/m} \right)^{2m}$$

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

Cas tests

III.b : Déséquilibre de pressions dans un matériau homogène partiellement saturé

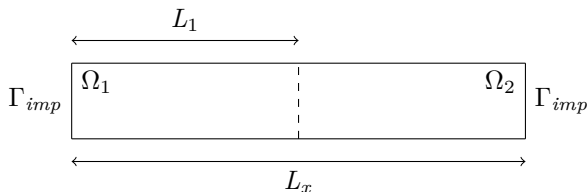


Milieu poreux			Caractéristiques des fluides		
k	10^{-16}	m^2	D_l^h	$3 \cdot 10^{-9}$	m^2/s
Φ	0.3	(-)	μ_l	$1 \cdot 10^{-3}$	$Pa \cdot s$
P_r	$2 \cdot 10^6$	Pa	μ_g	$9 \cdot 10^{-6}$	$Pa \cdot s$
n	1.54	(-)	H^h	$7.65 \cdot 10^{-6}$	$mol/Pa/m^3$
S_{lr}	0.01	(-)	M^w	10^{-2}	kg/mol
S_{gr}	0	(-)	M^h	$2 \cdot 10^{-3}$	kg/mol
			ρ_l^{std}	10^3	kg/m^3
			T	303	K

L_x	1	m
L_1	0.5	m
$P_{l,1}$	10^6	Pa
$P_{g,1}$	10^6	Pa
$P_{l,2}$	10^6	Pa
$P_{g,2}$	$2.5 \cdot 10^6$	Pa
T_{simul}	10^6	s

$$p_c = P_r \left(S_{le}^{-1/m} - 1 \right)^{1/n}, \quad kr_l = \sqrt{S_{le}} \left(1 - (1 - S_{le}^{1/m})^m \right)^2 \quad \text{et} \quad kr_g = \sqrt{1 - S_{le}} \left(1 - S_{le}^{1/m} \right)^{2m}$$

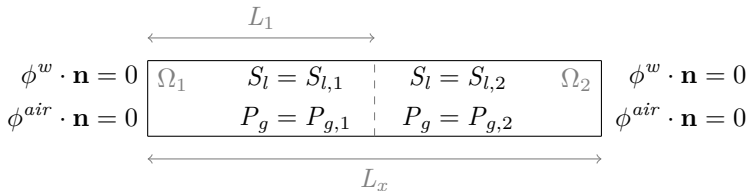
avec $S_{le} = \frac{S_l - S_{lr}}{1 - S_{lr} - S_{gr}}$ et $m = 1 - \frac{1}{n}$



- ▶ Ecoulement immiscible : 1 composant par phase
 - ▶ Pas de changement de phase
 - ▶ Pas de dissolution
 - ▶ Pas de diffusion
- ▶ Déformabilité du milieu suggérée pour son aspect régularisant

Cas tests

IV : Déséquilibre de pressions dans un matériau non homogène (immiscible)



	Milieu poreux			Caractéristiques des fluides		
	Ω_b	Ω_c				
k	10^{-20}	10^{-19}	m^2	μ_l	10^{-3}	$Pa \cdot s$
Φ	0.3	0.05	(-)	μ_g	$1.8 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s$
α	10^{-11}	10^{-11}	Pa^{-1}	ρ_l	10^3	kg/m^3
P_r	$1.5 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$	Pa	M^{air}	$28.96 \cdot 10^{-3}$	kg/m^3
m	0.06	0.412	(-)	T	300	K
a	0.25	1	(-)			
b	16.67	2.429	(-)			
c	1.88	1.176	(-)			
d	0.5	1	(-)			

L_x	1	m
L_1	0.5	m
$S_{l,1}$	0.77	(-)
$P_{g,1}$	10^5	Pa
$S_{l,2}$	1	(-)
$P_{g,2}$	10^5	Pa
T_{simul}	10^5	s

$$p_c = P_r \left(S_l^{-1/m} - 1 \right)^{1-m} ; \quad kr_l = \left(1 + a \left(S_l^{-b} - 1 \right)^c \right)^{-d} ; \quad kr_g = (1 - S_l)^2 (1 - S_l^{5/3})$$

$$\text{Déformation du solide : } \partial_t \phi = \alpha \partial_t P_l$$

I.a

I.b

II.a

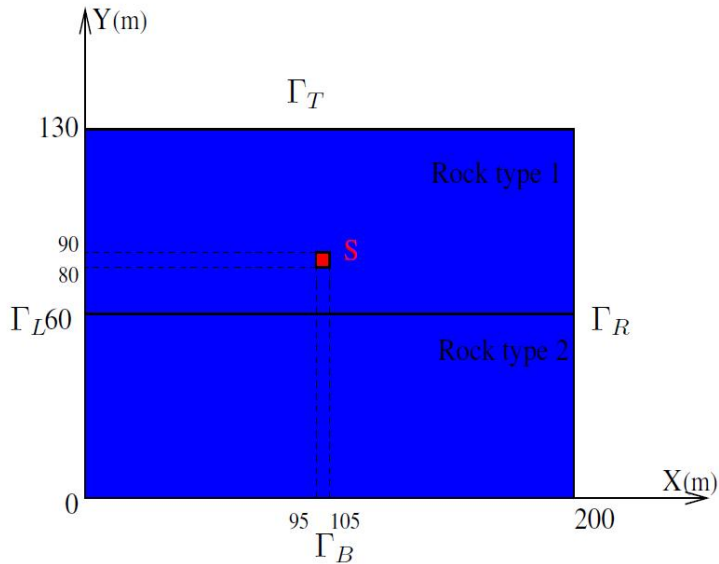
II.b

III.a

III.b

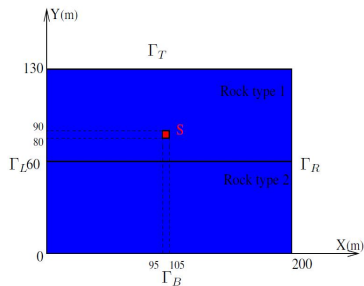
IV

V



Cas tests

V : Injection dans un matériau non homogène saturé en liquide (2D)



$$P_l = 4.2 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_T$$

$$P_l = 5.5 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_B$$

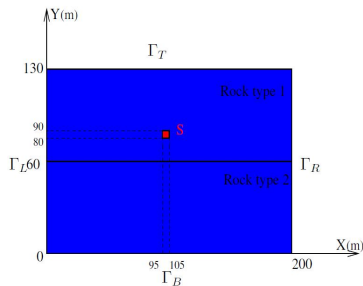
$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = \phi^h \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_L \text{ et } \Gamma_R$$

$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \partial S$$

$$\phi^h \cdot \mathbf{n} = Q^h \quad \text{sur } \partial S$$

Cas tests

V : Injection dans un matériau non homogène saturé en liquide (2D)



$$P_l = 4.2 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_T$$

$$P_l = 5.5 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_B$$

$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = \phi^h \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_L \text{ et } \Gamma_R$$

$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \partial S$$

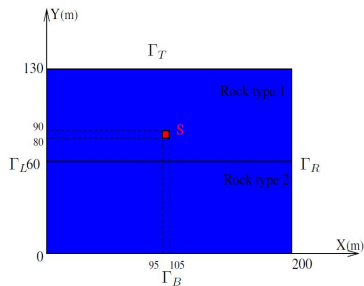
$$\phi^h \cdot \mathbf{n} = Q^h \quad \text{sur } \partial S$$

► Injection d'hydrogène

$$Q^h = \begin{cases} 52 \cdot 10^{-6} \text{ mg/m}^2/\text{ans} & \text{si } 0 \text{ ans} \leq t \leq 500 \text{ ans} \\ 26 \cdot 10^{-6} \text{ mg/m}^2/\text{ans} & \text{si } 500 \text{ ans} \leq t \leq 530 \text{ ans} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Cas tests

V : Injection dans un matériau non homogène saturé en liquide (2D)



$$P_l = 4.2 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_T$$

$$P_l = 5.5 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_B$$

$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = \phi^h \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_L \text{ et } \Gamma_R$$

$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \partial S$$

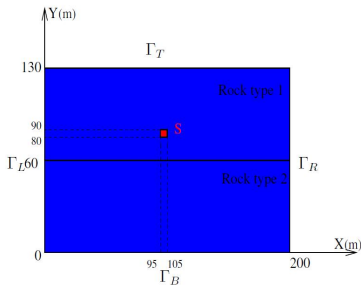
$$\phi^h \cdot \mathbf{n} = Q^h \quad \text{sur } \partial S$$

► Conditions initiales

- Saturées en liquide : $S_l = 1$
- Pression liquide hydrostatique
- Pas d'hydrogène : $x_i^h = 0$

Cas tests

V : Injection dans un matériau non homogène saturé en liquide (2D)



$$P_l = 4.2 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_T$$

$$P_l = 5.5 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_B$$

$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = \phi^h \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_L \text{ et } \Gamma_R$$

$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \partial S$$

$$\phi^h \cdot \mathbf{n} = Q^h \quad \text{sur } \partial S$$

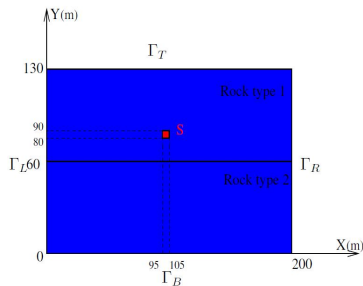
	Milieu poreux			Caractéristiques des fluides		
	Concrete package		COX			
k	10^{-19}	$5 \cdot 10^{-21}$	m^2	D_l^h	$1.189 \cdot 10^{-9}$	m^2/s
Φ	0.15	0.15	(-)	μ_l	$1 \cdot 10^{-3}$	$Pa \cdot s$
P_r	$2 \cdot 10^6$	$15 \cdot 10^6$	Pa	μ_g	$9 \cdot 10^{-6}$	$Pa \cdot s$
n	1.54	1.49	(-)	H	$7.65 \cdot 10^{-6}$	$mol/Pa/m^3$
S_{lr}	0.01	0.4	(-)	M^h	$2 \cdot 10^{-3}$	kg/mol
S_{gr}	0	0	(-)	ρ_l^{std}	10^3	kg/m^3
				T	303	K

$$p_c = P_r \left(S_{le}^{-1/m} - 1 \right)^{1/n} , \quad kr_l = \sqrt{S_{le}} \left(1 - \left(1 - S_{le}^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad \text{et} \quad kr_g = \sqrt{1 - S_{le}} \left(1 - S_{le}^{1/m} \right)^{2m}$$

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

Cas tests

V : Injection dans un matériau non homogène saturé en liquide (2D)



$$P_l = 4.2 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_T$$

$$P_l = 5.5 \text{ MPa} , S_l = 1 \quad \text{sur } \Gamma_B$$

$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = \phi^h \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \Gamma_L \text{ et } \Gamma_R$$

$$\phi^w \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{sur } \partial S$$

$$\phi^h \cdot \mathbf{n} = Q^h \quad \text{sur } \partial S$$

- ▶ Deux déclinaisons du cas test
 - ▶ Rock type 1 = COX
Rock type 2 = Concrete package
 - ▶ Rock type 1 = Concrete package
Rock type 2 = COX