

Quelques données relatives au stockage de déchets en milieu souterrain 2D

7 avril 2006

1 Physique du problème : caractéristiques et modèles d'un milieu poreux

Le cadre physique de notre problème est celui d'un milieu poreux saturé. Nous allons d'abord définir quelques caractéristiques propres à ce milieu.

Le modèle mathématique que nous considérons consiste a priori en un modèle de transport de contaminant (1) régi par un modèle d'écoulement défini en (4).

L'équation de transport de contaminant est :

$$\frac{R\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_e \nabla C) + V \nabla C + \lambda RC = Q \quad \text{dans } [0, T] \times \Omega \quad (1)$$

où

- C est la concentration d'un radionucléide en solution, (ML^{-3}),
- V la vitesse de Darcy, (LT^{-1}),
- D_e le tenseur de diffusion effective, (L^2T^{-1}),
- λ la constante de dégradation, (T^{-1}),
- R le facteur de retard,
- Q un terme source ($\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$).

Le tenseur D_e de diffusion effective vaut

$$D_e = \frac{A}{\omega}$$

où

- ω est la porosité,
- A est le tenseur de dispersion-diffusion.

La **porosité totale** d'un matériau définit la densité des pores pouvant être occupée par un fluide. Elle s'exprime par :

$$\omega = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total de l'échantillon}}$$

En milieu saturé, l'eau occupe tous les pores. Ainsi, la proportion en eau du matériau est égale à la porosité totale du matériau.

Le **tenseur de dispersion-diffusion** se décompose selon (2) :

$$A = A_c + A_m \tag{2}$$

où

- A_c est le tenseur de dispersion cinématique :

$$A_c = \|V\|(\alpha_l E(V) + \alpha_t (I - E(V)))$$

où $E_{i,j} = \frac{V_i V_j}{\|V\|^2}$ $i, j = 1, 2$, la dispersivité longitudinale (L) est α_l , α_t est la dispersivité transversale (L). La dispersion cinématique est un phénomène de mélange lié à l'hétérogénéité du champ de vitesse de l'écoulement à l'échelle microscopique [1].

Ordre de grandeur pour α_l et α_t d'après [2] :

- $\alpha_l = 0.1 x$, où x est une distance moyenne caractéristique parcourue,

- $\alpha_t = 0.1 \alpha_l$.

- A_m est le tenseur de diffusion moléculaire dans le milieu poreux ($L^2 T^{-1}$). La vitesse V de l'écoulement en milieu poreux se modélise généralement par l'**équation de Darcy** [3]. Elle exprime la vitesse de filtration en régime transitoire ou permanent en une fonction linéaire du gradient de pression et de la gravité. Pour un fluide incompressible, la loi de Darcy s'écrit sous la forme générale (3) :

$$V = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla z) \text{ dans } \Omega \tag{3}$$

où

- p est la pression, $(\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2})$,
 - k la perméabilité intrinsèque du milieu, (L^2) ,
 - μ la viscosité du fluide, $(\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1})$,
 - ρ la masse volumique, (ML^{-3}) ,
 - g l'accélération de la pesanteur, (LT^{-2}) ,
 - z est la profondeur, (L) ,
- L'équation d'écoulement est :

$$\nabla \cdot \left(-\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla z) \right) = q, \quad \text{dans } \Omega \quad (4)$$

Nous ne prenons pas en compte la limite de solubilité C_{sat} .

2 Structure d'un stockage de déchets nucléaires en milieu géologique profond

Un stockage de déchets est caractérisé par plusieurs échelles propres, définies par ordre croissant en terme de taille :

- L'alvéole, figure 3. Un ensemble d'alvéoles forme un module.
- Le module dont un ensemble forme la zone de stockage.
- La zone de stockage, figure 2. L'ensemble des zones de stockages forme le stockage.
- Le site de stockage lui même, figure 1.

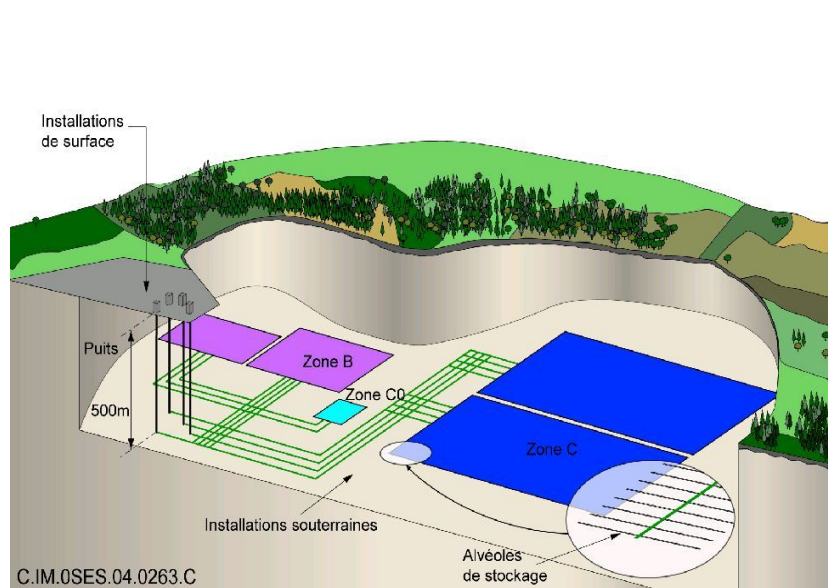


FIG. 1 – Structure d'un site de stockage des déchets nucléaires en milieu géologique profond

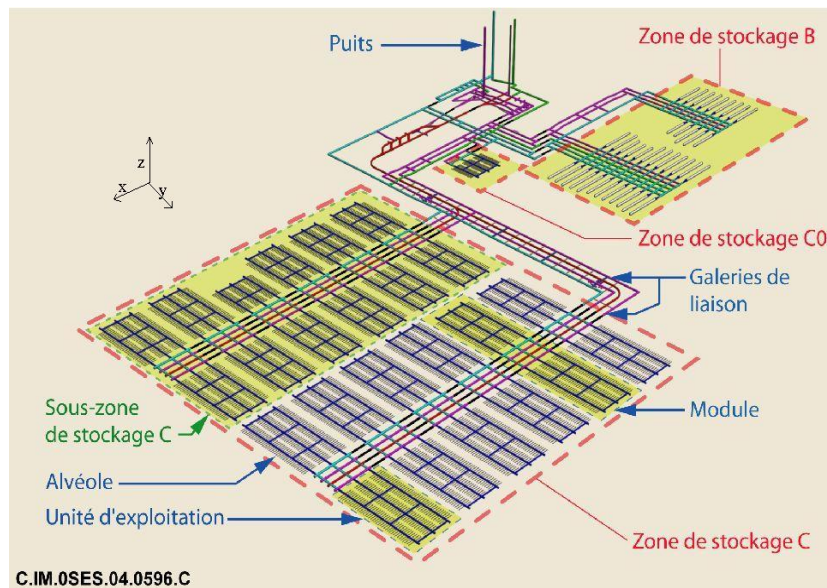


FIG. 2 – Composition d'une zone d'un stockage des déchets nucléaires en milieu géologique profond

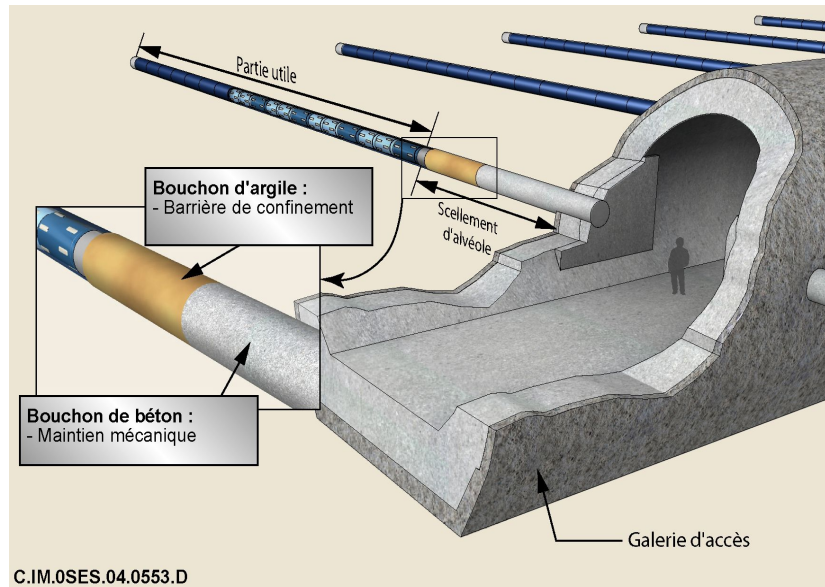


FIG. 3 – Structure d'un module : alveoles + galerie

3 Les données

3.1 Les scénarii étudiés

Nous nous plaçons dans le cadre d'un stockage de déchets radioactifs de type C. Considérons les isotopes I^{129} et Pu^{242} . Nous prenons le repère (O,x,y,z) défini dans la Figure 2. Par souci de simplification, nous supposons la convection indépendante du temps. Nous allons considérer en 2D trois scénarios différents avec une géométrie de même type :

P1 : Passage zone de stockage - champ lointain, Figure 4. Nous allons ici considérer une coupe longitudinale de la zone de stockage, avec 15 modules. Nous cherchons à obtenir la concentration en radionucléides I^{129} et Pu^{242} sur le toit (vocabulaire géologique pour désigner la partie supérieure) du Callovo-oxfordien et de l'Oxfordien ainsi que les flux sur le mur de l'Oxfordien (vocabulaire géologique pour désigner partie inférieure). Les conditions aux limites en transport sont résumées sur le schéma figure 5. les conditions aux limites en hydrauliques sont résumées sur le schéma figure 6. Les flèches représentent les gradients de charge, notés J , qui doivent être modélisés où $V = KJ$. Les valeurs

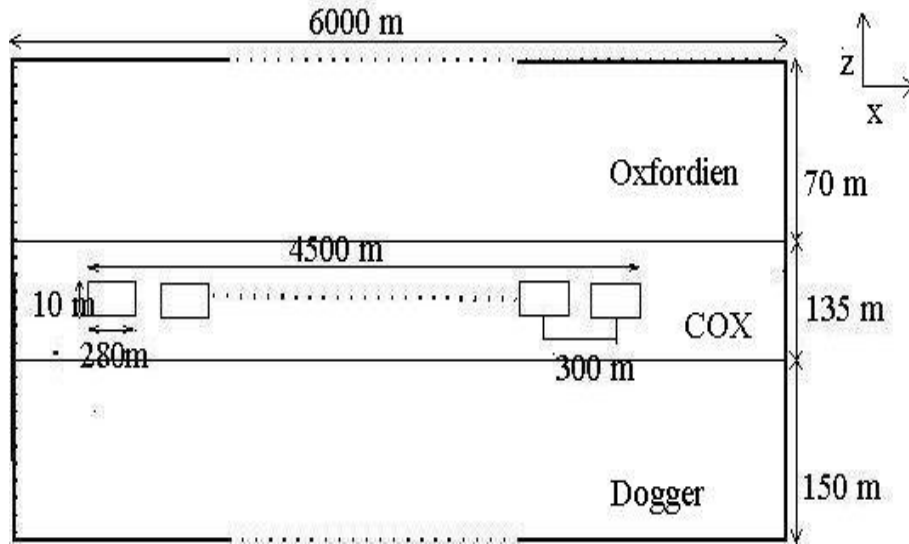


FIG. 4 – Configuration P1 : 15 modules

de charges H permettent de simuler de tels gradients et sont dans la gamme des valeurs réalistes.

- P2 : Passage alvéole - module**, Figure 7. Nous allons ici considérer une coupe transversale d'un module de stockage, avec 60 alvéoles. Nous cherchons à obtenir les concentrations en I^{129} et Pu^{242} . Ce scénario est inclus dans la couche hôte. Les conditions aux limites en transport sont résumées sur le schéma figure 8. Quant à l'écoulement, nous nous basons sur la valeur du gradient de charge que l'IRSN a obtenu dans un scénario (calcul SEN IRSN pour le Dossier 2005) similaire au cas P2 (0.06 m/a, l'écoulement allant de la tête de l'alvéole vers le bouchon).
- P3 : Passage module - zone de stockage**, Figure 9. Nous allons ici considérer une coupe longitudinale de la zone de stockage, avec 90 alvéoles. Nous cherchons à calculer les flux d'activité des isotopes I^{129} et Pu^{242} vers les couches Oxfordien et Dogger. Remarquons que le domaine d'étude est inclus dans la couche hôte. Nous pouvons considérer des galeries endommagées (qui seraient représentées par des rectangles de $10 \times 10 \text{ m}^2$ entre les alvéoles ayant les caractéristiques adéquates). Les conditions aux limites en transport sont résumées sur le schéma figure 10. Quant à l'écoulement, les valeurs de charge pour les conditions aux

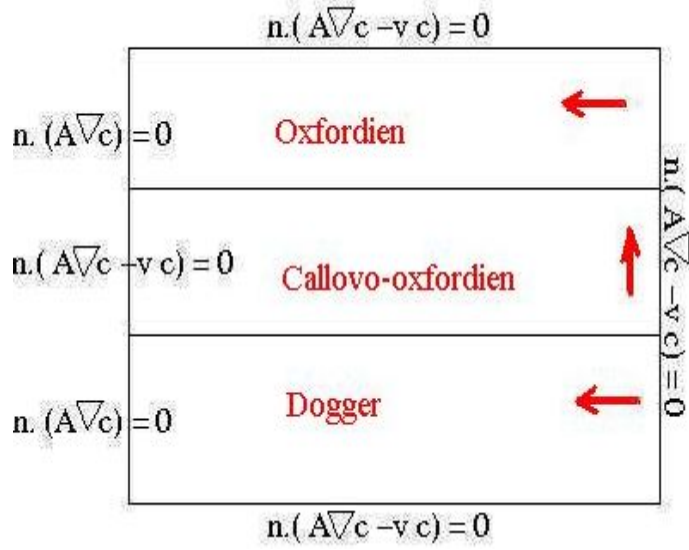


FIG. 5 – Conditions aux limites en transport du scénario P1

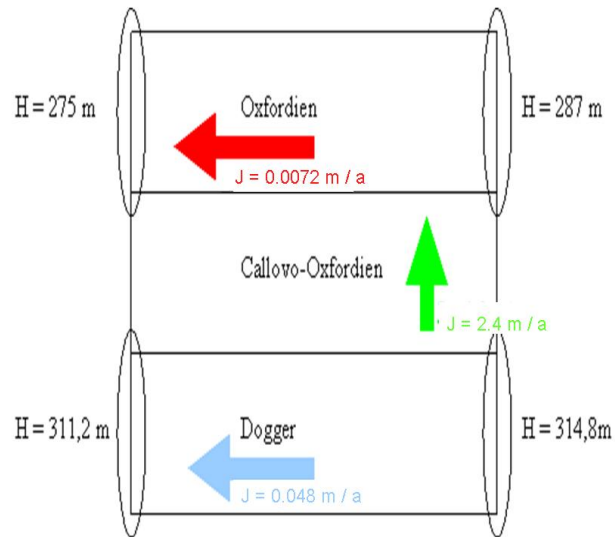


FIG. 6 – Conditions aux limites en écoulement du scénario P1

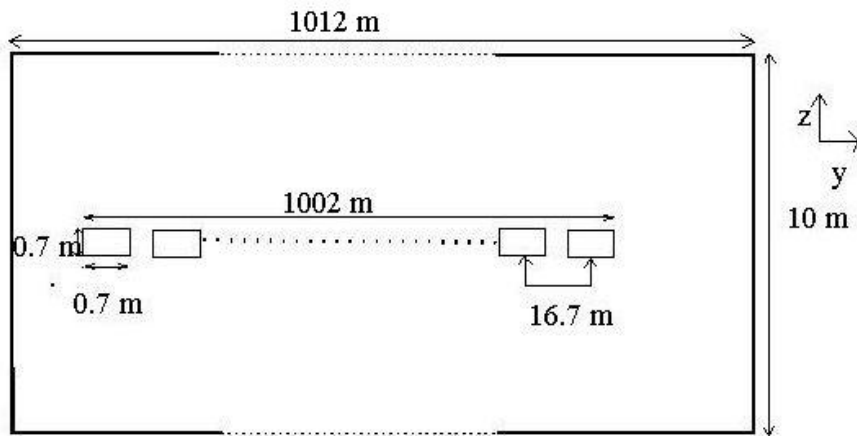


FIG. 7 – Configuration P2 : 60 alvéoles

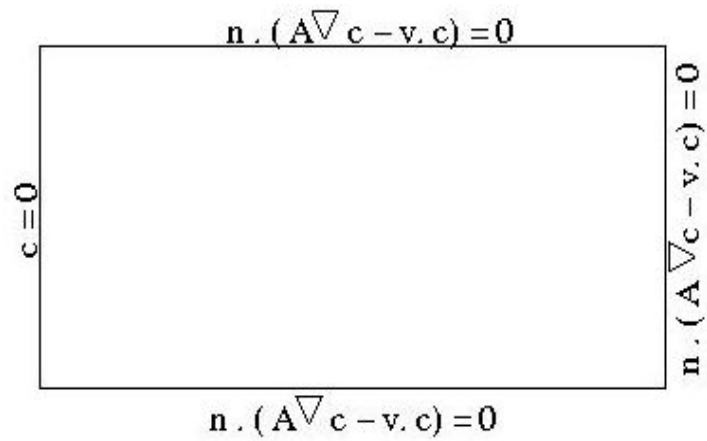


FIG. 8 – Conditions aux limites en transport du scénario P2

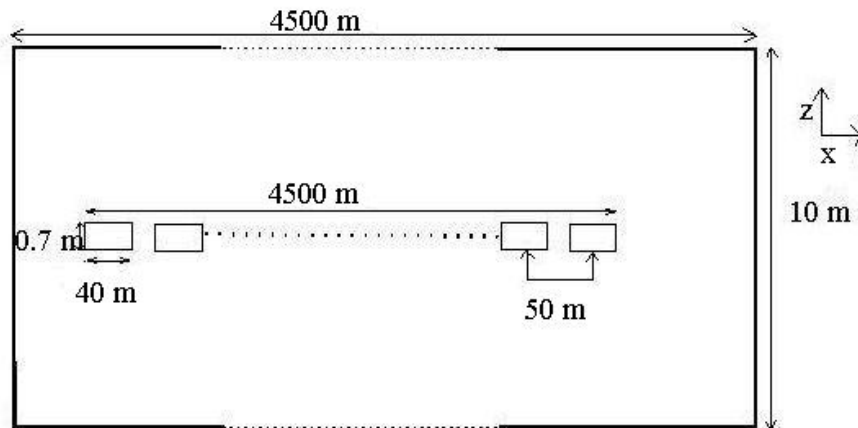


FIG. 9 – Configuration P3 : 90 alvéoles

limites du scénario P3 peuvent être déduites des résultats du scénario P1.

Nous laissons toute latitude sur le niveau de détail (prise en compte de bouchons dans les alvéoles dans P3 par exemple, si la source est volumique) pris en compte dans les diverses configurations. Le nombre de modules ou d'alvéoles peut naturellement varier selon les besoins.

3.2 Les données géométriques

Les données géométriques du milieu géologique sont rassemblées dans le tableau 1 et celles relatives au stockage dans le tableau 2.

3.3 Données géologiques selon les isotopes

Les caractéristiques physiques relatives à I^{129} se trouvent dans le tableau 4. Les caractéristiques physiques relatives au plutonium Pu^{242} se trouvent dans le tableau 3.

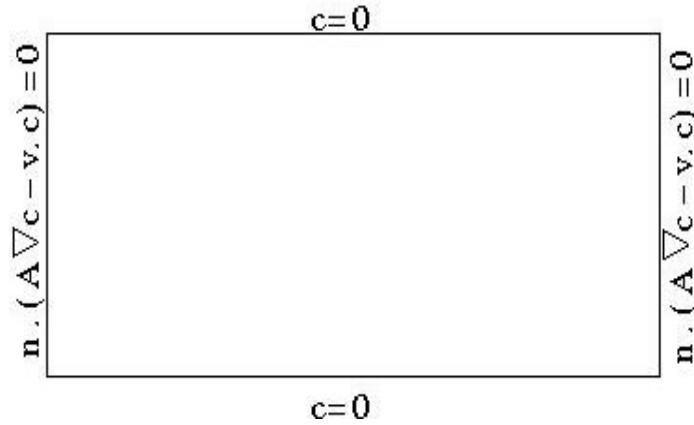


FIG. 10 – Conditions aux limites en transport du scénario P3

données	domaine calc.	Oxfordien	COX	Dogger
Longueur (m)	6000.	6000.	6000.	6000.
Largeur(m)				
Epaisseur(m)	685.	400.	135.	150.

TAB. 1 – Données géométriques du milieu géologique

3.4 Les sources

Nous considérons les sources volumiques des isotopes I^{129} et Pu^{242} représentées respectivement sur les Figures 11 et 12. Les lois probabilistes les régissant seront discutées lors de notre prochaine réunion en mai 2006.

Références

- [1] A. Bourgeat, M. Jurak, A. Piatniski *Averaging a transport equation with small diffusion and oscillating velocity*, Math. Meth. Appl. Sci, 26 :95–117, 2003
- [2] C.A.J. Appelo, D. Postma, *Geochemistry, groundwater and pollution*, AA. Balkema, Rotterdam, Brookefield, 1999.

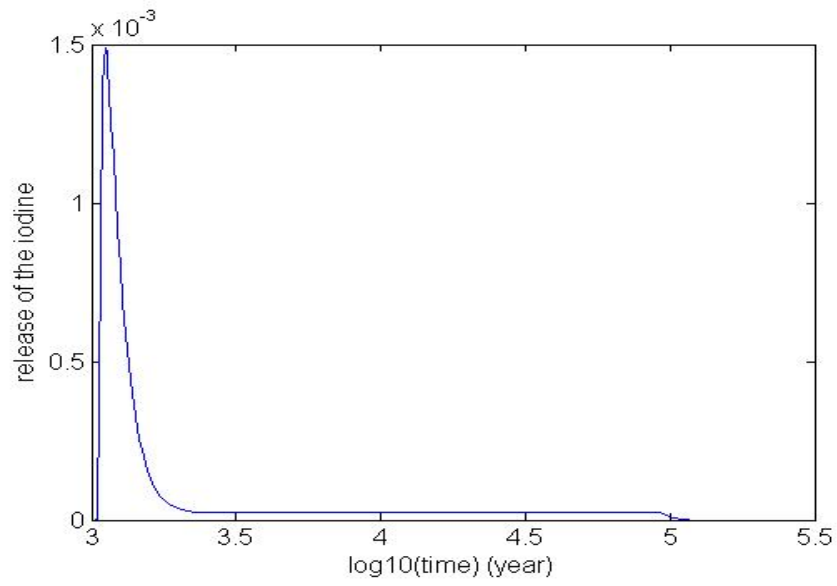


FIG. 11 – Relachement de I^{129}

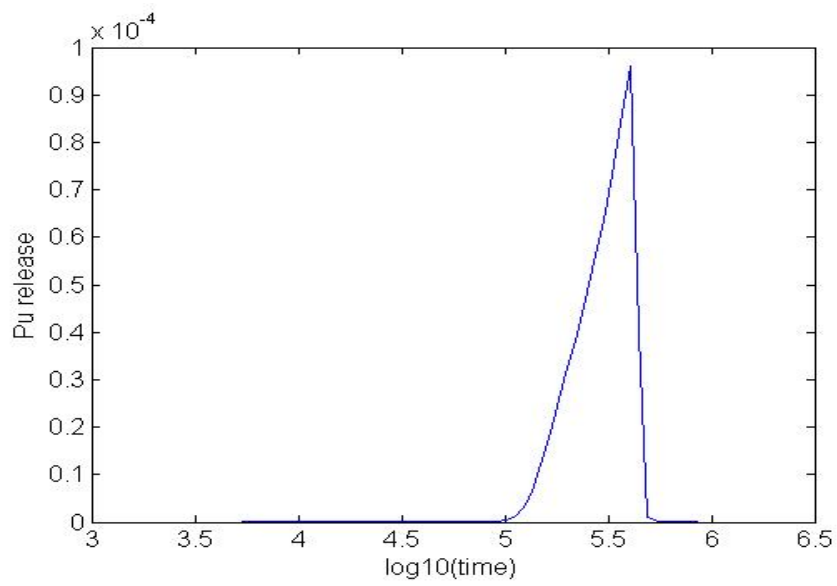


FIG. 12 – Relachement de Pu^{242}

Données	Stockage	Module	Alvéole
Nombre	1	15	60
Longueur (m)	4500.	1002.	40.
Largeur (m)	1200.	280	0.7
Diamètre(m)	/	5.	0.7
Dist. entre-axe module L (m)		300	
Dist. entre-axe alvéole L (m)			16.7
Dist. inter-module l (m)		20.	
Dist. inter-alvéole l (m)			16.

TAB. 2 – Données géométriques du stockage

Période	Données	$K_h K_v (m.a^{-1})$	$\omega_{diffusion}$	$D_e (m^2.a^{-1})$	R
3.74 10^5 ans	Bouchons	$3.15 \cdot 10^{-4}$	0.36	$1.58 \cdot 10^{-4}$	4900
	Dogger	$2.1 \cdot 10^{-3}$	0.06	$3.15 \cdot 10^{-4}$	1
	Oxfordien	$4 \cdot 10^{-2}$	0.15	$3.15 \cdot 10^{-4}$	1
	COX	$\left\{ \begin{array}{l} K_h = 1.58 \cdot 10^{-5}, \\ K_v = 1.58 \cdot 10^{-6} \end{array} \right.$	0.18	$7.88 \cdot 10^{-3}$	11500
	Béton	$3.15 \cdot 10^{+1}$	0.3	$1.89 \cdot 10^{-2}$	140 000
	Micro-fissures	$1.58 \cdot 10^{-3}$	0.18	$7.88 \cdot 10^{-3}$	11500
	Fractures	$1.58 \cdot 10^{-1}$	0.20	$1.58 \cdot 10^{-2}$	10000

TAB. 3 – Caractéristiques physiques Pu^{242}

- [3] J. Bear *Hydraulic of groundwater*, Mc Grew-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, New-York, 1979.

Période	Données	$K_h K_v (m.a^{-1})$	$\omega_{diffusion}$	$D_e (m^2.a^{-1})$	R
$1.6 \cdot 10^7$ ans	Bouchons	$3.15 \cdot 10^{-4}$	0.05	$1.58 \cdot 10^{-4}$	1
	Dogger	$2 \cdot 10^{-3}$	0.06	$3.15 \cdot 10^{-4}$	1
	Oxfordien	$4 \cdot 10^{-2}$	0.15	$3.15 \cdot 10^{-4}$	1
	COX	$\left\{ \begin{array}{l} K_h = 1.58 \cdot 10^{-5}, \\ K_v = 1.58 \cdot 10^{-6} \end{array} \right.$	0.05	$1.58 \cdot 10^{-4}$	1
	Béton	$3.15 \cdot 10^{+1}$	0.3	$1.89 \cdot 10^{-2}$	8
	Micro-fissures	$1.58 \cdot 10^{-3}$	0.05	$1.58 \cdot 10^{-4}$	1
	Fractures	$1.58 \cdot 10^{-1}$	0.15	$3.15 \cdot 10^{-4}$	1

TAB. 4 – Caractéristiques physiques I^{129}