

# Approche hydrodynamique des aquifères fissurés en zone de socle par la méthode de la fracture unique et du MPE : cas d'études dans le massif armoricain et conséquence pour la protection de captage

## Hydrodynamic approach of fissured aquifers in hard rock zone by the method of the single fracture and MPE: case studies in the armorican massif and consequence to the catchment protection

Gaillard Olivier, Gaillard Thierry

Safege Ingénieurs Conseils

olivier.gaillard@safège.fr, thierry.gaillard@safège.fr

### I. Préambule

Les roches dites de socle doivent leurs propriétés aquifères à l'acquisition d'une perméabilité secondaire essentiellement fissurale. Deux modèles hydrodynamiques conceptuels sont classiquement utilisés selon la représentation des fonctions transmissives et capacitives de ce type d'aquifère : le modèle continu équivalent et le modèle discontinu à fracture unique ou réseaux de fractures discrètes.

**L'objet de cet article est de comparer les résultats obtenus par ces deux approches et de débattre des méthodes de dimensionnement des aires de protection de captage.**

### II. Aspects théoriques

L'ouverture d'une fracture peut être déterminée par différentes techniques expérimentales dont les essais de pompage et les traçages. Les ouvertures modélisées par test hydraulique ou traçage ont une signification différente des ouvertures mesurables sur affleurement. En effet les ouvertures mesurées directement sont des ouvertures discrètes alors que celles obtenues par des essais sont des ouvertures équivalentes : elles représentent l'ouverture d'une fracture unique représentative pour tout le volume de roche testé.

#### II.1 Ouverture déterminée par la loi cubique

L'écoulement dans une fracture est calculé en considérant l'ouverture  $b$  entre deux plaques parallèles. Le fluide s'écoule selon la loi de Poiseuille [1] avec une distribution parabolique des vitesses (fig. 1).

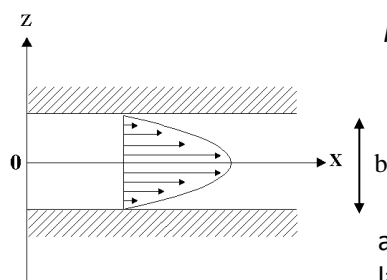


Figure 1 – Distribution des vitesses pour l'écoulement laminaire d'un fluide incompressible entre deux plaques parallèles.

$$u(z) = \frac{\rho g b^2}{8\mu} \frac{dh}{dx} \left( 1 - \frac{4z^2}{b^2} \right) \quad (1)$$

avec  $u$  la vitesse du fluide [ $L^2T^{-1}$ ] ;  $h$  la charge [ $L$ ] ;  $x$  la distance longitudinale [ $L$ ] ;  $z$  la distance transversale [ $L$ ] ;  $b$  l'ouverture [ $L$ ] ,  $\mu$  la viscosité dynamique [ $ML^{-1}T^{-1}$ ] ,  $g$  l'accélération de la pesanteur [ $LT^{-2}$ ] et  $\rho$  la masse volumique du fluide [ $ML^{-3}$ ].

La loi cubique de Lomize-Snow permet d'écrire l'ouverture de la fracture entre deux plaques (équation 2) :

$$b = \left( K_f \frac{12\mu}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{ou encore} \quad b = \left( T \frac{12\mu}{\rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Avec  $b$  l'ouverture [L],  $K_f$  la conductivité hydraulique de la fracture [LT<sup>-1</sup>],  $T$  la transmissivité [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>].

En utilisant la loi cubique (2), on peut déterminer une ouverture de fracture équivalente à partir des valeurs de transmissivités obtenues par l'interprétation des données expérimentales de pompage et de traçage. Smith et al. [2] proposent trois modèles déterministes pour estimer l'ouverture d'une fracture ( $b$ ) : un calcul à partir du débit de pompage (ouverture hydraulique), un calcul par bilan volumique (ouverture volumique) et enfin le calcul par l'intermédiaire d'un temps de transport d'un traceur (ouverture « traceur »).

## II.2 Estimation de l'ouverture hydraulique

En coordonnées radiales, la loi de Poiseuille appliquée à un essai de pompage de débit  $Q$  entre un forage et un piézomètre permet de calculer l'ouverture hydraulique de la fracture (notée  $b_h$ ) :

$$b_h = \left[ \frac{Q}{\Delta H} \frac{6\mu}{\pi\rho g} \ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

avec  $b_h$  l'ouverture hydraulique [L] ;  $Q$  le débit pompé [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>] ;  $\Delta H$  la différence de charge [L] ;  $r_w$  le rayon du puits [L] ;  $r_0$  la distance radial du piézomètre [L].

## II.3 Estimation de l'ouverture avec bilan volumique

En considérant une ouverture  $b$ , le volume d'eau contenu entre deux cylindres concentriques est :

$$V = \pi b (r_0^2 - r_w^2) \quad (4)$$

Pour un traceur cheminant par advection de  $r_0$  vers  $r_w$ , ce volume de fluide est extrait par le pompage d'essai. En prenant  $t_w$  comme étant le temps de transit de  $r_0$  vers  $r_w$ , alors le volume d'eau extrait de la fracture est égal au volume pompé pendant le temps  $t_w$ .

$$Q.t_w = \pi b (r_0^2 - r_w^2) \quad (5)$$

L'ouverture avec bilan volumique (notée  $b_v$ ) est alors donnée par :

$$b_v = \frac{Q.t_w}{\pi(r_0^2 - r_w^2)} \quad (6)$$

## II.4 Estimation d'une ouverture à partir d'un traçage d'essai

Le temps de transit  $t_w$  d'un point d'injection à un point de pompage (essai radial convergent) est donné par :

$$t_w = \int_{r_0}^{r_1} \frac{1}{v} dl \quad (7)$$

L'intégration sur la ligne de courant injection-pompage permet de calculer l'ouverture  $b_t$  :

$$b_t = \left[ \frac{6\mu \ln(r_0/r_w)}{\rho g t_w \Delta H} (r_0^2 - r_w^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Pour Smith et al. [2] l'ouverture hydraulique  $b_h$  est la plus représentative. Tsang [3] interprète les résultats selon la direction du flux par rapport aux directions de la fissure, expliquant de la sorte les divergences expérimentales entre les valeurs de  $b_h$  et  $b_t$ .

### III. Cas d'études en zone de socle

Les méthodes d'évaluation de l'ouverture équivalente d'une fracture ont été testées sur deux sites du massif armoricain (fig. 2) : à Malestroit (site de Gandouin) et à Lannilis (site de Lanveur).

A Malestroit, l'aquifère étudié est la formation de Gandouin (s1a) assimilée au Llandovery inférieur (début du Silurien). Ce sont des grès quartziques pyriteux composés de deux unités : des grès quartziques assez grossiers et d'aspect saccharoïde (membre inférieur, environ 20 m) et des grès-quartziques plus fins (membre supérieur, 20-25 m).

A Lannilis, le contexte est très différent puisque l'aquifère capté se trouve à proximité d'une zone de contact entre le granite de Ploudalmézeau-Kernilis intrusif dans la formation des micaschistes de l'Aber Wrac'h.



Figure 2 – localisation des sites de Gandouin et de Lanveur (France).

#### III. 1 Le site de Gandouin (Malestroit, Morbihan, France)

Le site expérimental de Gandouin, étudié dans le cadre de travaux universitaires [4], est situé au sud-est de la ville de Malestroit dans le Morbihan. Cette ancienne carrière à ciel ouvert, fut exploitée de 1978 à 1990 pour l'extraction de granulats, et est équipé de 7 piézomètres. L'arrêt de l'exploitation a entraîné la formation d'un plan d'eau en raison de l'arrêt des pompes d'exhaures.

Une carte piézométrique du site au 29/06/99 (fig. 3) montre que l'écoulement se fait globalement d'Ouest en Est.

L'étude de la fracturation du site expérimental permet d'identifier deux directions principales de fracturation : N110°E et N0, la direction N110°E étant la principale direction de fracturation [4]. L'écoulement est donc parallèle à la principale direction de fracturation.

L'ouverture d'une fracture équivalente a ensuite été estimée par les méthodes proposées par Smith et al. [2] en utilisant les résultats de traçages. Les trois types d'ouverture ont été testés sur les traçages d'essais qui ont été réalisés sur le site de Gandouin, avec injection sur Pz3. Le tableau 1 montre la comparaison des valeurs obtenues pour les différents types d'ouverture. Ce sont les résultats obtenus par la méthode de Sauty qui ont été utilisés [5]. Les données obtenues par calage sur l'ensemble de la courbe de restitution ou seulement sur la montée ont été distinguées.

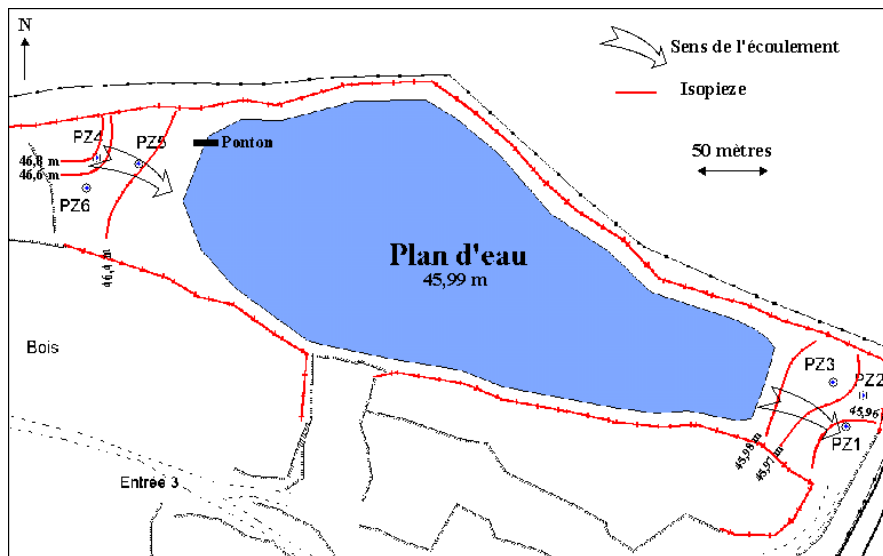


Figure 3 – Description et piézométrie du site expérimental de Gandouin [4]

	Traçage	$b_h$ (mm)	$b_v$ (mm)	$b_t$ (mm)	$Q$ ( $m^3/s$ )	$r_o$ (m)	$r_w$ (m)	$t_w$ (s)
Calage sur la montée	PZ1 Iodure	2,491	46,36	0,58	$3,21 \cdot 10^{-3}$	15,95	0,0575	11547
	PZ2 Iodure	2,476	74,45	0,45	$3,10 \cdot 10^{-3}$	12,08	0,0575	11000
	PZ2 Chlorure	2,202	88,73	0,35	$3,24 \cdot 10^{-3}$	9,65	0,0575	8000
Calage sur l'ensemble de la courbe	PZ1 Iodure	2,491	51,26	0,55	$3,21 \cdot 10^{-3}$	15,95	0,0575	12768
	PZ2 Iodure	2,476	90,50	0,41	$3,10 \cdot 10^{-3}$	12,08	0,0575	13370
	PZ2 Chlorure	2,202	88,73	0,35	$3,24 \cdot 10^{-3}$	9,65	0,0575	8000

Tableau 2 – Comparaison des valeurs d'ouvertures obtenues par les trois méthodes

On observe que  $b_v \gg b_h > b_t$ . En appliquant la théorie de Tsang [3], le site de Gandouin serait dans une configuration d'écoulement non parallèle aux directions d'ouverture. Cette conclusion signifierait que le pompage modifie localement les directions d'écoulement et sollicite les fractures N0 en sus de celles orientées N110°E.

Notons que l'ouverture  $b_h$  (2,5 mm) apparaît la plus proche des valeurs mesurées sur les parois de grès de la carrière, qui vont de 2 à 6 mm pour 67 % des relevés (fig. 4, [4]).

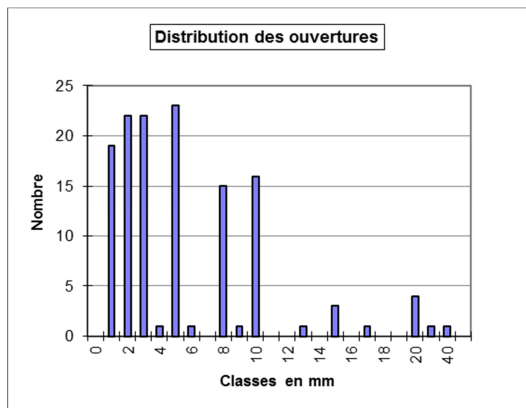


Figure 4 – Distribution des ouvertures des fractures mesurées sur le site de Gandouin

L'ouverture hydraulique ( $b_h$ ) semble donc la plus représentative des mesures directes car elle est moins sensible aux perturbations du champ d'écoulement causées par la géométrie du réseau (Cf. [3]). La seconde ne permet pas une bonne estimation de l'ouverture en raison de sa sensibilité concernant l'erreur de la géométrie de la zone où a lieu le pompage.

## II.2 Le site de Lanveur (Lannilis, Finistère, France)

Le site de Lanveur se trouve au sud de Lannilis, dans le Finistère. Il s'agit du site de captage pour la production d'eau potable de la commune de Lannilis (Finistère), sur lequel un récent forage vient d'être réalisé [6] avec pompage et traçage radial convergent. Il est constitué d'un forage de reconnaissance F2 et

d'un troisième forage F3, réalisé en 2015 par l'entreprise MASSE sous maîtrise d'œuvre SAFEGE [6] à 7 m de F2. Une piézométrie de la zone d'étude avait été réalisée par ANTEA en 2003 (figure 5, [7]) attestant d'une continuité des potentiels à l'échelle pluridécamétrique et d'un écoulement E-W.

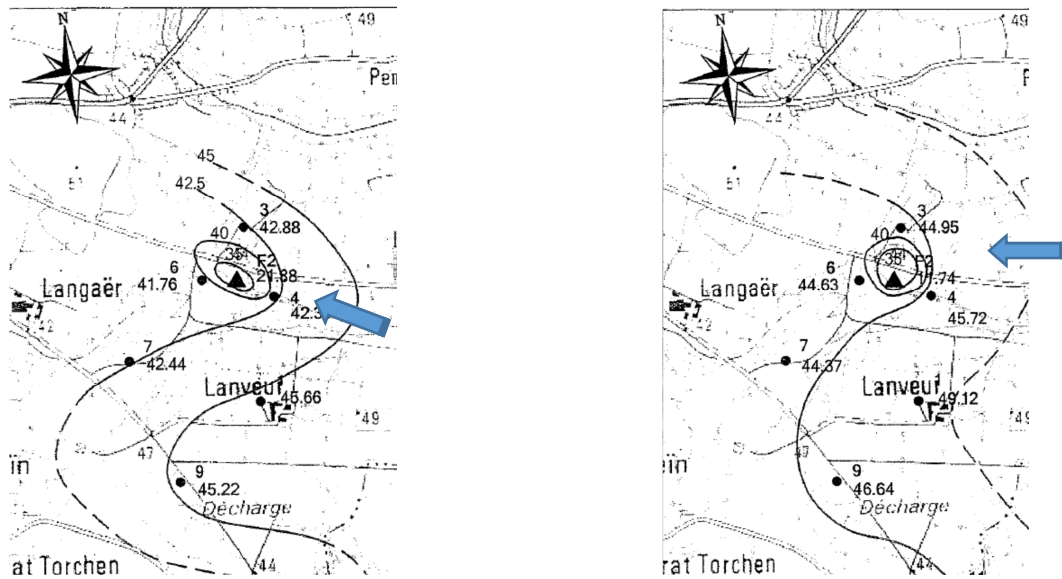


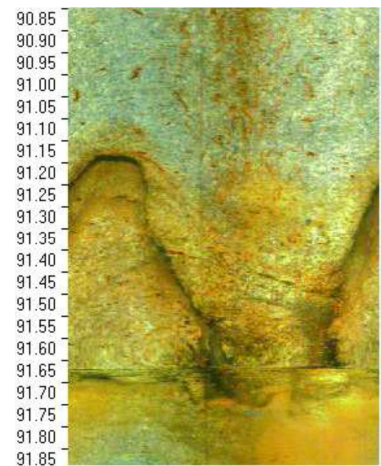
Figure 5 – piézométrie du site de Lanveur (Lannilis) d'après [6]

A gauche : Basses eaux (22/10/2003) et à droite Hautes eaux (11/02/2004)

Une imagerie de parois a permis en préambule de caractériser la fracturation du F3. Sur les 55 fissures et 28 fractures ouvertes observées, seules 6 d'entre-elles se sont avérées être des arrivées d'eau. Une structure oblique orientée N240°E avec un pendage de 70° et une ouverture de 5 mm (fig. 6) apporte à elle seule 45 % du débit à 20 m<sup>3</sup>/h [6]. Elle se trouve à 91,20 m de profondeur et n'est donc pas parallèle au vecteur d'écoulement piézométrique.

Figure 6 – imagerie de paroi de la principale arrivée d'eau [8]

Un pompage de 96 heures avec un traçage radial convergent entre F2 et F3 ont été réalisés en 2015. Le débit de pompage était de 20 m<sup>3</sup>/h et l'injection de fluoréscéine dans F2 a été réalisée avec 200 g de poudre diluée dans 20 L, dont on trouvera les résultats bruts dans [9] et [6]. Ces essais permettent l'évaluation de  $b_h$ ,  $b_v$  et  $b_t$ .



	Traçage	$b_h$ (mm)	$b_v$ (mm)	$b_t$ (mm)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$r_o$ (m)	$r_w$ (m)	$t_w$ (s)
Calage sur la montée	F2-F3	0,94	477,76	0,05	$5,61 \cdot 10^{-3}$	7	0,07	1000
Calage sur l'ensemble de la courbe	F2-F3	0,94	477,76	0,04	$5,61 \cdot 10^{-3}$	7	0,07	8000

Tableau 3 – Comparaison des valeurs d'ouvertures obtenues par les trois méthodes

L'ouverture déterminée par traçage donne des résultats très inférieurs aux valeurs obtenues par l'ouverture hydraulique, car sa caractérisation dépend en grande partie de l'orientation du flux par rapport à l'axe de fracturation ([3],[10]). Dans le cas de Lanveur, les résultats concordent avec la théorie qui veut que  $b_t < b_h$  lorsque l'écoulement n'est pas parallèle aux directions d'ouverture ([3]). L'ouverture hydraulique apparaît la plus proche des ouvertures évaluée en imagerie optique (de l'ordre de quelques mm). Par ailleurs, comme sur le site de Gandouin, la méthode du bilan fournit des résultats peu réalistes de l'ouverture de fissure.

#### IV. Comparaison des résultats avec l'approche milieu continu

Sur les deux sites étudiés, les résultats expérimentaux concordent avec la théorie de Tsang [3]. On pourrait renverser ce postulat en supposant que si  $b_t < b_h$ , alors la direction d'écoulement n'est pas parallèle à la direction d'ouverture, ce qui tendra à augmenter le parcours d'une pollution vers un pompage ou une source.

La question plus générale qui se pose en terme de protection de la ressource est de choisir le modèle hydrogéologique le plus représentatif des conditions d'écoulement, et du point de vue de l'ingénierie, le plus simple à appliquer. L'approche classique consiste à assimiler le milieu fracturé à un milieu poreux équivalent. La méthode d'interprétation de Theis [10] est la plus fréquemment usitée. En effet, on peut définir, en analogie avec la loi de Darcy [11], une conductivité hydraulique d'une fracture de type plaque parallèle par l'équation (9) :

$$K_f = \frac{\rho g b^2}{12\mu} \quad (9)$$

$K_f$  la conductivité hydraulique de la fissure [LT-1]

Nonobstant la problématique de la géométrie de la fissure (remplissage, irrégularité et rugosité), les sites ont été testés pour évaluer la représentativité d'un milieu équivalent à un milieu poreux (MPE).

Sur le site de Lanveur, le calage des essais de pompage avec la solution de Theis donne une transmissivité moyenne en  $1.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, soit, sur les 50 mètres d'aquifère capté, une perméabilité de  $2.10^{-5}$  m/s. Or, la perméabilité équivalente (équation 9) déduite du calcul d'ouverture de  $b_h$  est de l'ordre de  $7,6.10^{-4}$  m/s. A l'échelle du site, le milieu poreux équivalent (MPE) donne donc une perméabilité beaucoup trop faible, sauf à diminuer considérablement l'épaisseur captée et lui donner une valeur de l'ordre 1,3 mètre !

Sur le site de Gandouin, l'interprétation des essais de pompages sur Pz1 et Pz2 avec la méthode de Theis (avec limite d'alimentation) montre que la perméabilité déduite de cette solution représente bien une perméabilité fissurale équivalente sur Pz1, la corrélation sur Pz2 distant de seulement 12 m, étant moins bonne.

	Kf (avec $b_h$ )	Kf (avec $b_t$ )	K (Theis)
pz1	1,40E-02	1,66E-04	1,74E-04
pz2	1,19E-02	6,20E-05	1,50E-04

Tableau 4 – Comparaison des perméabilités en m/s fissurales ( $K_f$ ) K déduit de la solution de Theis ( $K_{Theis}$ ) sur le site de Gandouin

Sur la partie ouest (Pz4, Pz5 et Pz6) aucun ajustement à l'équation de Theis n'a pu être obtenu. Les essais de pompage ont dû être ajustés avec la solution de Barker [13] en faisant varier la dimension d'écoulement dans l'équation :

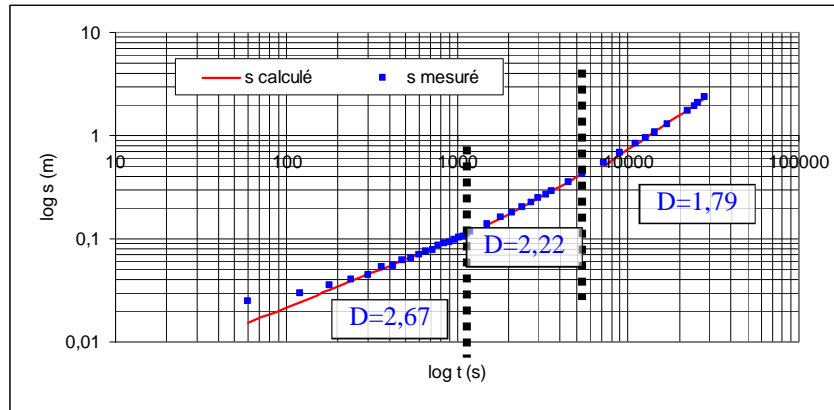
$$h(r, t) = \frac{Qr^{2N}}{4\pi^{1-N}K_f a^{3-D}} \Gamma(-N, u) \quad (10)$$

avec  $u = \frac{r^2 S_s f}{4K_f t}$ ,  $h(r, t)$  la charge hydraulique [L] au point de rayon  $r$  [L] et au temps  $t$  [T],  $Q$  le débit [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>],  $\Gamma$  la fonction Gamma incomplète,  $D$  la dimension d'écoulement ( $N=1-D/2$ ),  $S_s f$  le coefficient d'emmagasinement spécifique de la fissure [L-1] et  $a$  un entier pouvant correspondre à l'épaisseur d'aquifère capté.

La forme concave des courbes de rabattements mesurés pour les pompages de la partie ouest du site de Gandouin (pompage Pz4 et Pz6) a nécessité un ajustement de la dimension d'écoulement et un calage des paramètres  $K_f$ ,  $S_s$  et  $D$  pour chaque portion de courbe. La dimension d'écoulement passe successivement de 2,67 à 2,22 puis à 1,79 (fig. 7). Le fait de passer d'une dimension d'écoulement proche de 3 à une dimension d'écoulement de l'ordre de 1 implique plusieurs phénomènes. Au début du pompage

l'écoulement est sphérique, l'aquifère étant sollicité dans son intégralité et dans toutes les directions de l'espace. Ensuite au fur et à mesure du pompage, l'aquifère n'est sollicité que sur certaines fractures (écoulement radial) et en fin de pompage, il ne reste qu'une fracture, ou une partie de fracture lorsque celle-ci est chenalisée, qui participe à l'écoulement (écoulement linéaire).

Figure 7 – Calage du pompage sur Pz4 avec la solution de Barker.



Au final, la méthode de Barker a donc nécessité de faire varier la dimension d'écoulement  $D$  en fonction du temps, avec  $\lim_{t \rightarrow \infty}(D) = 1$ . Cette solution montre différentes phases de sollicitation de la ressource sur 24 heures de pompage, qu'on peut interpréter comme la sollicitation d'une seule fracture quand  $t \rightarrow \infty$ .

## V. Discussion : les méthodes de dimensionnement des aires de protection de captage

La difficulté à représenter le milieu fissuré comme un milieu continu a abondamment été relatée dans la littérature, certains sites répondant mal à une modélisation par un MPE [12]. Selon Le Borgne et al. [15] les modèles dépendant de l'échelle d'observation tels ceux de Barker [13] ou d'Acuna&Yortsos [14] semblent plus facilement ajustables aux données expérimentales.

La protection des aires d'alimentation de captage, fondée sur la vitesse d'écoulement dans l'aquifère par convection pure, peut conduire à des dimensionnements très différents des surfaces à protéger selon 1) le choix de la méthode et 2) de la valeur d'ouverture retenue. Les deux équations analytiques simples sont en effet :

$$v_{Darcy} = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dx} \text{ en MPE} \quad (11) \quad \text{et} \quad v_{fracture} = \frac{\rho g b^2}{12\mu} \frac{dh}{dx} \quad (12)$$

L'utilisation de l'équation (11) nécessite de connaître un nouveau paramètre (la porosité efficace  $n_e$ ) dont la signification en milieu fissuré est sujette aux mêmes discussions que la transmissivité. De plus, son domaine de validité dans le temps se doit d'être confirmé par un pompage de longue durée, pour établir les limites du système fracturé capté et l'évolution des écoulements (radial, bilinéaire, linéaire).

L'usage de l'équation (12) repose, quant à elle, sur la connaissance de l'ouverture  $b$ , dont nous avons vu que les valeurs dépendaient de la méthode d'estimation et de la relation entre la direction de l'écoulement et l'orientation des fractures. Ce paramètre intervenant au cube, une attention particulière doit être portée à son calcul. Sur nos deux sites, l'ouverture hydraulique  $b_h$  paraît la plus proche des mesures in situ (affleurement et imagerie de parois de forages).

En appliquant les équations (11) et (12) à la partie orientale du site de Gandouin, la distance parcourue pour un isochrone 50 jours le long d'une ligne de courant a pu être calculé. Dans le cas de Gandouin, le traceur ayant été injecté sur toute la colonne d'eau, des porosités efficaces très fortes ont été déterminées avec l'équation de Sauty (10 à 20%), probablement du fait de la nature du site (exploitation avec tirs d'explosif). De ce fait, la vitesse de Darcy reste faible devant la vitesse dans une fracture (tab. 5).

Solution analytique	Gandouin Pz1	Gandouin Pz2
Darcy – approche continue	7,5	6,5
Lomize-Snow – fracture unique	121,3	102,9

Tableau 5 – Comparaison distance parcourue en m pour les deux approches ( $t=50$  j)

Par expérience, d'autres sites, assimilables du point de vue de la perméabilité à un MPE, donnent des résultats contradictoires du fait d'une faible porosité efficace qui tend à augmenter la valeur de la vitesse de Darcy (équation 11). Ce critère de dimensionnement des aires de protection est donc très critiquable.

Pour ces raisons, la protection des captages en zone de socle nécessite 1°) d'évaluer la compartimentation de l'aquifère, ses limites et son comportement à long terme par des essais de pompages de longue durée (1 à plusieurs mois) et 2°) des traçages afin d'appréhender les vitesses de transfert à faibles et longues distances.

### Références bibliographiques :

- [1] Poiseuille, 1844. Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de très petits diamètres, Paris, 123 p.
- [2] Smith, L., Mase, C.W. and Schwartz, F.W., 1987. Estimation of fracture aperture using hydraulic and tracer tests, 28<sup>th</sup> US Symposium on Rock Mechanics, Tucson, pp. 453-463.
- [3] Tsang, Y.W., 1992. Usage of equivalent apertures for fractures as derived from hydraulic and tracer tests. Water Resources Research, 28(5), pp 1451-1455
- [4] Gaillard O., 2001. Caractérisation in situ des réservoirs en roches massives fracturées : écoulement, transport et acidification des eaux. Site expérimental de Gandouin (Morbihan France). Doctorat de l'Université de Poitiers, 203 p
- [5] Sauty J.-P., 1977. Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage, Thèse soutenue à l'université INP Grenoble, 157 p.
- [6] Gaillard T., 2015. Réalisation d'un forage d'exploitation (F3) à Lannilis (29), Compte-rendu de fin de travaux de forage (Morbihan France). SAFEGE, S14DRE009, version 1, avril 2015, 189 p.
- [7] Duchêne R., 2004. Etude de la stabilité physico-chimique des eaux des forages F1 et F2 sur le site de Lanveur à Lannilis (Finistère). Rapport final. ANTEA A33275/B, Juillet 2004, 52 p.
- [8] Chalmet P., Cousin L., 2015. Diagraphies : rapport de mesures, Forage : Lannilis, Intervention du 12/01/2015. SOLEO, 32 p.
- [9] Mennechet H., Mondain P.-H., 2015. Réalisation d'un traçage hydrogéologique entre 2 forages, Lannilis (Finistère) CALLIGEE N15-29022, février 2015, 13 p.
- [10] National Research Council (1996) : Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, Washington, DC: The National Academies Press, 1996.,
- [10] Theis C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and the duration of discharge of a well using groundwater storage. Amer. Geophys. Union, Transactions, 16. Pp. 519-524
- [11] Darcy H. (1856) : Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau, ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de toile et de bitume, Paris : V. Dalmont, Libraire des Corps impériaux des Ponts et Chaussées et des Mines, 1856.
- [12] Bangoy, L.M., 1992. Hydrodynamique d'un site expérimental en aquifère du socle fissuré; nouvelle méthode d'interprétation des essais hydrauliques. Thèse de doctorat Thesis, Université de Montpellier (France), 138 p.
- [13] Barker, J.A., 1988. A generalised radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. Water Resour. Res., 24(10). pp 1796-1804
- [14] Acuna J. A., Yortsos Y. C., 1995. Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient, Water Resour. Res., 31(3), pp. 527-540
- [15] Le Borgne, T., O. Bour, J. R. de Dreuzy, P. Davy, and F. Touchard, 2004. Equivalent mean flow models for fractured aquifers : Insights from a pumping tests scaling interpretation, Water Resour. Res., 40(3) Article first published online: 30 mar 2004 | DOI: 10.1029/2003WR002436, 12 p.
- [16] Piggott, A.R., Huynh, T.N.T., Lapcevic, P.A. and Novakowski, K.S., 1996. Automated analysis of hydraulic and tracer tests conducted in fractured rocks. Hydrogeology Journal, 4(3). pp 84-93