



**HAL**  
open science

# Vertical anisotropy of hydraulic conductivity in fissured layer of hard-rock aquifers due to the geological structure of weathering profiles

Jean-Christophe Maréchal, Robert Wyns, Patrick Lachassagne, K. Subrahmanyam, Frédéric Touchard

► **To cite this version:**

Jean-Christophe Maréchal, Robert Wyns, Patrick Lachassagne, K. Subrahmanyam, Frédéric Touchard. Vertical anisotropy of hydraulic conductivity in fissured layer of hard-rock aquifers due to the geological structure of weathering profiles. *Comptes Rendus Géoscience*, 2003, 335, pp.451-460. 10.1016/s1631-0713(03)00082-8 . hal-00458977v1

**HAL Id: hal-00458977**

**<https://hal.science/hal-00458977v1>**

Submitted on 22 Feb 2010 (v1), last revised 27 Jun 2023 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Rubrique : Géosciences de surface (Hydrologie-Hydrogéologie)**

**Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle :  
concordance avec la structure géologique des profils d'altération**

Jean-Christophe Maréchal<sup>a,\*</sup>, Robert Wyns<sup>b</sup>, Patrick Lachassagne<sup>c</sup>, Kambhampati Subrahmanyam<sup>d</sup>, Frédéric Touchard<sup>a</sup>

<sup>a</sup> BRGM, Service EAU, Unité « Ressources en eau, Milieux Discontinus », Centre Franco-Indien de Recherche sur les Eaux Souterraines, NGRI, Uppal Road, 500 007 Hyderabad, India

<sup>b</sup> BRGM, Service CDG/MA, 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans, France

<sup>c</sup> BRGM, Service EAU, Unité « Ressources en eau, Milieux Discontinus » 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier, France

<sup>d</sup> National Geophysical Research Institute, Centre Franco-Indien de Recherche sur les Eaux Souterraines, Uppal Road, 500 007 Hyderabad, India

\* Correspondance : Indo-French Centre for Groundwater Research, National Geophysical Research Institute, Uppal Road, 500 007 Hyderabad, India, Tel: + 91 40 715 80 90, Fax: + 91 40 717 15 64, [marechal@ngri.res.in](mailto:marechal@ngri.res.in)

**Résumé** - Des essais de pompage, réalisés au sein de l'horizon fissuré d'un aquifère de socle granitique, interprétés aux puits d'observation au moyen de la solution analytique de Neuman et aux puits de pompage au moyen de celle de Gringarten, mettent en évidence l'anisotropie verticale de cet horizon constitutif de l'aquifère ; la perméabilité horizontale étant nettement et systématiquement supérieure à la perméabilité verticale. Ces résultats concordent parfaitement avec les observations géologiques, l'horizon fissuré du profil d'altération du granite montrant de nombreuses fissures sub-horizontales. Ils confirment le caractère dominant, au sein de l'horizon fissuré, de la perméabilité des fissures subhorizontales dues au processus d'altération sur celle des fractures subverticales d'origine tectonique.

**Mots-clés** : altération, socle, fracture horizontale, Inde, anisotropie, pompage d'essai, granite

## 1. Introduction

Les roches de socle (roches plutoniques et métamorphiques) ne sont aquifères qu'au sein de leur frange superficielle, sur les 100 premiers mètres environ sous la surface du sol [3, 14], qui a été soumise à des processus d'altération supergène [18, 19].

Le profil d'altération type comprend, de haut en bas, les horizons suivants, qui possèdent des propriétés hydrodynamiques spécifiques (Fig. 1) :

- les altérites (ou saprolite) couvrent la roche « saine » sur une épaisseur variable (de 0, là où cet horizon est érodé, à plusieurs dizaines de mètres). Du fait de sa dominante argileuse (argilo-sableuse dans le cas de roches riches en quartz), ce compartiment se caractérise par une porosité d'interstices significative (au sein de granites porphyriques, la porosité efficace peut dépasser 5%) et par une perméabilité relativement faible. Lorsqu'il est saturé en eau, ce compartiment assure une fonction capacitive de stockage des eaux souterraines au sein de l'aquifère ;
- l'horizon fissuré est constitué de roche dure affectée, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, par la présence de fissures, de fréquence décroissante avec la profondeur. Il est maintenant démontré que ces fissures, dont l'origine a longtemps été associée à la « décompression superficielle », résultent elles aussi du processus d'altération [18, 19]. Leur genèse est due principalement à l'altération des minéraux phylliteux (biotite en particulier) dont le gonflement provoque cette fissuration. Au sein de roches à texture isotrope (granites par exemple), la fissuration s'exprime préférentiellement le long de plans subhorizontaux, perpendiculaires à la contrainte minimale. Par conséquent, ces plans sont généralement parallèles à la morphologie contemporaine de l'altération. Au sein de roches anisotropes non plissées (granites foliés, gneiss), la fissuration reste planaire mais son orientation et son intensité sont déterminés par l'angle formé par la foliation et la surface topographique. Au sein de roches intensément plissées (schistes, micaschistes), la fissuration a une orientation généralement aléatoire, même à l'échelle de l'affleurement. Au sommet de l'horizon fissuré, la fréquence des microfissures devient voisine de la taille du grain de la roche (de l'ordre du millimètre), marquant la transition avec les altérites sus-jacentes. Une conséquence importante de ces modalités de genèse est que l'horizon fissuré du granite est parallèle aux paléosurfaces d'altération. Cet horizon assure la fonction transmissive de l'aquifère et est capté par la plupart des forages réalisés en région de socle,
- le substratum sain n'est perméable que très localement, là où il est affecté par des fractures d'origine tectonique, le plus souvent sub-verticales.

Ces (paléo) profils d'altération sont connus dans de très nombreuses régions du monde [13]: Amérique du Nord, Amérique du Sud, Afrique, Inde, Chine, Corée, Japon, Australie, Europe, y compris Europe du Nord [9, 10, 15, 17], etc.

La compréhension, d'une part des modalités de genèse de ces profils d'altération (conditions géomorphologiques, climatiques, géodynamiques, de durée) et d'autre part des conditions de leur éventuel démantèlement ultérieur par l'érosion, a permis de mettre au point une méthode de cartographie de l'épaisseur résiduelle de ces différents compartiments aquifères, qu'il est possible de mettre en œuvre à l'échelle de bassins versants de plusieurs dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés de superficie [15, 16, 19]. Les cartes obtenues permettent de caractériser la variabilité spatiale des propriétés hydrogéologiques des roches de socle, à cette même échelle, et de réaliser, par exemple, des cartes prédictives des potentialités en eau souterraine d'une région donnée [8, 19].

La disponibilité de ces éléments cartographiques ouvre également des perspectives en terme de mise en œuvre, au sein de ces aquifères spécifiques, des modèles de gestion de la ressource en eau souterraine classiquement utilisés au sein des milieux poreux (modèles « maillés » [7]).

Les écoulements souterrains peuvent être modélisés au sein de chacune des couches dont la géométrie est ainsi définie, à l'échelle du bassin versant, seule pertinente pour la gestion des ressources en eau.

Dans ce cadre, les altérites peuvent aisément être assimilées à un milieu poreux. Des travaux sont par contre nécessaires pour caractériser les propriétés hydrodynamiques de l'horizon fissuré, dans la perspective de prendre en compte l'hétérogénéité et l'anisotropie de ses propriétés de manière pertinente à l'échelle de la maille d'un modèle hydrogéologique. Le présent travail s'attache à la caractérisation de l'anisotropie de perméabilité au sein de la zone fissurée.

## **2. Caractérisation géologique du profil d'altération**

Dans la perspective de la mise au point de la méthodologie de modélisation des aquifères de socle présentée ci-dessus, des travaux de recherche sont mis en œuvre conjointement par le BRGM et le National Geophysical Research Institute, dans le cadre du Centre Franco-Indien de recherche sur les Eaux Souterraines (CEFIREs) d'Hyderabad (Inde).

Le bassin versant étudié autour du village de Maheshwaram, situé à 30 kilomètres au sud d'Hyderabad, d'une soixantaine de kilomètres carrés de superficie, est majoritairement composé de granites archéens à texture isotrope : granites porphyroïdes à biotite et leucogranites.

Les profils d'altération y sont aisément observables grâce aux nombreux puits ouverts creusés par les agriculteurs au début du siècle pour l'irrigation de leur terre (Fig. 2). Ces profils sont généralement tronqués par l'érosion, l'horizon fissuré apparaissant sous les altérites, dont l'épaisseur dépasse rarement 5 mètres. Une forte densité de fissures sub-horizontales est observée dans la zone fissurée, comme illustré sur la photographie de la Fig. 2. Des diaclases verticales, dont l'origine pourrait être tectonique, sont également présentes.

Du fait de la surexploitation des eaux souterraines, les niveaux piézométriques sont profonds sur le site de Maheshwaram. Par conséquent, sur la majorité du bassin versant, seul l'horizon fissuré de l'aquifère est saturé en eau, les altérites étant dénoyées. Cette particularité a été mise à profit pour réaliser des pompages d'essai destinés à caractériser les propriétés hydrodynamiques du seul horizon fissuré et, en particulier, pour déterminer si des analogies existent entre la structure géologique de cette couche (fissuration à dominante subhorizontale) et ses propriétés hydrodynamiques.

## **3. Anisotropie verticale de la perméabilité au sein de la zone fissurée**

Deux essais de pompage de moyenne durée (17 et 12 heures), à débit constant, ont été réalisés, avec mesure des rabattements aux puits d'observation et de pompage, sur deux forages expérimentaux réalisés sur le bassin versant. Les rabattements aux puits d'observation ont été interprétés par la méthode de Neuman [12] tandis que les rabattements au puits ont été analysés au moyen de la méthode de la fracture horizontale de Gringarten [5].

### **3.1. Méthode de Neuman aux puits d'observation**

A titre d'exemple, sur un diagramme bi-logarithmique (Fig. 3), les courbes de rabattement observé aux puits d'observation IFP-1/1 et IFP-1/2 lors de l'essai de pompage au puits IFP-1 (voir Tableau I pour les détails de l'essai) montrent une forme complexe, difficilement interprétable par les méthodes classiques. Les courbes de rabattement sont composées de trois segments : le premier, pour les temps courts, avec des pentes relativement fortes, est suivi d'une période intermédiaire durant laquelle une stabilisation des niveaux semble prendre place ; une troisième phase caractérise ensuite les temps plus longs et montre un nouvel accroissement des pentes.

La théorie initialement développée par Boulton [1] pour interpréter ce type de courbe de rabattement fait appel à la notion de « débit retardé issu de l'effet capacitif d'aquifères libres » - « delayed yield from storage in unconfined aquifers » [2]. Elle a été améliorée par Neuman [11, 12] qui a développé une solution analytique de l'équation de la diffusivité adaptée aux aquifères libres anisotropes.

Neuman [12] considère que l'aquifère est libre et d'extension infinie. Il repose sur une couche horizontale imperméable. L'aquifère est homogène mais anisotrope et ses perméabilités principales  $K_r$  et  $K_z$  sont orientées parallèlement aux axes de coordonnées  $(r, z)$ . Lorsqu'un débit constant  $Q$  est pompé dans un puits complet, l'eau provient d'une part de l'emménagement au sein de l'aquifère et d'autre part du drainage gravitaire à sa surface libre. La solution de Neuman, donnée sous forme d'abaque, exprime les rabattements réduits

dans un piézomètre situé à une distance radiale  $r$  du puits de pompage,  $s_{DN} = \frac{4\pi T}{Q}$  en

fonction :

- du temps réduit  $t_s = \frac{Tt}{Sr^2}$  pour les courbes de type A ;

- du temps réduit  $t_y = \frac{Tt}{S_y r^2}$  pour les courbes de type B ;

où  $T$  désigne la transmissivité de l'aquifère,  $S$  le coefficient d'emménagement,  $S_y$  la porosité de drainage,  $t$  le temps depuis le début du pompage. Le principe de la méthode de Neuman repose sur un ajustement des rabattements observés aux temps courts sur une courbe théorique de type A (déstockage au sein de l'aquifère) et des rabattements aux temps longs (déstockage lié au drainage gravitaire) sur une courbe de type B. Chaque courbe est caractérisée par un

paramètre  $\beta = \frac{r^2 K_D}{b^2}$  où  $b$  désigne l'épaisseur initiale saturée de l'aquifère et  $K_D = \frac{K_z}{K_r}$  le

rapport d'anisotropie de l'aquifère.

Les données expérimentales recueillies lors de l'essai de pompage à IFP-1 permettent des ajustements sur l'abaque de Neuman (Fig. 3) avec les mêmes valeurs du paramètre  $\beta$ , tant pour les courbes A que pour les courbes B, comme le requiert cette technique d'interprétation. Les paramètres hydrauliques obtenus au moyen de ces ajustements sont donnés au sein du Tableau I, pour les essais de pompage à IFP-1 et IFP-9.

Les valeurs très similaires obtenues dans chacun des puits d'observation, pour  $T_A$  et  $T_B$ , mettent en évidence la cohérence de l'interprétation de cet essai de pompage au moyen de la méthode de Neuman.

Les coefficients d'emménagement ( $S$ ) présentent des valeurs réalistes pour ce type de milieu rocheux. Il en est de même de la porosité de drainage, dont les valeurs sont comparables à celles obtenues tant de manière indirecte par mesures RMP [18,19] que dans un puits proche, par ajustement des fluctuations de niveaux piézométriques avec les précipitations au moyen d'un modèle global [4].

Le rapport d'anisotropie de l'aquifère ( $K_D$ ) est dépendant de  $b$ ,  $r$  et  $\beta$ . Alors que les deux derniers paramètres sont bien connus, le premier est incertain dans ce type d'aquifère fracturé. Des essais au micro-moulinet, effectués dans huit puits du bassin versant, montrent que les fractures hydrauliquement actives sont situées dans l'horizon fissuré, c'est à dire dans l'horizon situé au-dessus du granite sain et compact. C'est notamment le cas dans les puits de pompage IFP-1 et IFP-9 (Fig. 4). Le sommet du granite sain a donc été retenu comme plancher de la nappe pour la détermination de  $b$ . Comme pour les méthodes classiques, l'incertitude sur la valeur de  $r$  au forage pompé rend néanmoins difficile toute interprétation quantitative des rabattements dans le puits de pompage.

Les résultats de l'interprétation, présentés au sein du Tableau II, indiquent une anisotropie du tenseur de perméabilité, en accord avec les observations géologiques : la perméabilité horizontale est systématiquement supérieure à la perméabilité verticale, ce qui peut être mis en regard de la structure de l'horizon fissuré, montrant majoritairement des fissures horizontales.

### 3.2. Méthode de Gringarten aux puits de pompage

Les profils au micro-moulinet (Fig. 4) suggèrent que peu de fractures sont actives dans les puits IFP-1 et IFP-9, respectivement trois (F1/1, F1/2 et F1/3) et une (F9/1). Lors de l'essai de pompage à IFP-1, étant donné le rabattement au puits et la faible valeur des pertes de charges quadratiques, seule la fracture profonde située à environ 31.5 mètres de profondeur (F1/3) n'a pas été dénoyée et est restée active durant tout l'essai. De façon similaire, la seule fracture active intersectée par IFP-9 (F9/1), localisée à 29 mètres de profondeur, est restée noyée durant l'essai de pompage. L'analyse par la méthode de Neuman effectuée ci-dessus suggère une anisotropie du milieu qui résulte de la présence de fractures horizontales. La méthode développée par Gringarten [6], pour un puits vertical traversant une fissure horizontale en milieu de perméabilité anisotrope, applicable au puits de pompage, est donc adaptée à la configuration hydrogéologique des puits IFP-1 et IFP-9.

La complexité de la solution analytique nécessite l'utilisation d'un abaque [5], dont les courbes expriment le rabattement réduit  $s_{DG}$  dans le puits en fonction du temps réduit  $t_{DG}$  pour différentes configurations géométriques représentées par le paramètre  $H_{DG}$ , quand la fracture

est au centre de l'aquifère ( $z_f/H = 0.5$ ), avec  $t_{DG} = \frac{K_r t}{S_s r_f^2}$ ,  $s_{DG} = \frac{4\pi \sqrt{K_r K_z} r_f s}{Q}$  et

$$H_{DG} = \frac{H}{r_f} \sqrt{\frac{K_r}{K_z}},$$

où  $z_f$  désigne la distance entre la fracture et la base de l'aquifère,  $H$  l'épaisseur de l'aquifère.  $K_r$ , la perméabilité dans la direction radiale parallèle à la fracture, peut être interprétée comme représentant la perméabilité augmentée par l'existence d'une fracture horizontale.  $K_z$ , la perméabilité dans la direction verticale, représente la perméabilité de la matrice,  $S_s$  le coefficient d'emmagasinement spécifique de l'aquifère,  $t$  le temps,  $r_f$  le rayon de la fracture horizontale,  $s$  le rabattement et  $Q$  le débit de pompage.

Les ajustements des rabattements observés sur l'abaque de Gringarten conduisent à des valeurs élevées de  $H_{DG}$ , suggérant une forte anisotropie de perméabilité. Connaissant les paramètres géométriques  $H$  et  $z_f$ , ainsi que le coefficient d'emmagasinement obtenu précédemment par la méthode de Neuman (moyenne de  $2.5 \cdot 10^{-6}$  à IFP-11 et IFP-1/2 et  $9.7 \cdot 10^{-5}$  à IFP-9), il est possible d'estimer le rayon de la fracture ainsi que les perméabilités horizontales et verticales de l'aquifère (Tableau III).

Dans les deux cas, l'anisotropie verticale est évidente, tandis que les rayons de fracture estimés (de 3 à 30 mètres) sont cohérents avec les observations de terrain.

### 4. Conclusion

Les observations géologiques effectuées sur les granites du bassin versant de Maheshwaram (Inde) confirment l'existence, comme dans de très nombreuses autres régions du monde, d'une forte densité de fractures horizontales au sein de l'horizon fissuré du profil d'altération. Elles montrent aussi la présence de quelques diaclases subverticales. Les mesures au micro-moulinet confirment qu'une faible fraction seulement de ces structures sont hydrauliquement actives.

L'interprétation de pompages d'essai sur plusieurs forages dotés de piézomètres montre systématiquement l'existence d'une anisotropie verticale de perméabilité : la perméabilité horizontale est de 2 à 30 fois supérieure à la perméabilité verticale. L'utilisation de la solution analytique de Gringarten permet en outre de déterminer le rayon des fractures horizontales intersectant les puits de pompage.

Ces résultats confirment le rôle majeur, à l'échelle du bassin versant, de la fissuration liée à l'altération, horizontale dans le cas de granites, dans l'acquisition de la perméabilité des roches de socle ; la fracturation de type tectonique jouant un rôle subordonné à cette échelle.

## 5. Remerciements

Ce travail a été réalisé par les chercheurs du Centre Franco-Indien (BRGM-NGRI) de Recherche sur les Eaux Souterraines. Les auteurs remercient le Ministère Français des Affaires Etrangères et le Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France à New Delhi, qui a financé les voyages d'experts français en Inde. Le Centre Franco-Indien de Recherche sur les Eaux Souterraines a par ailleurs bénéficié d'un financement du CNRS dans le cadre du Programme ACI « Eau et Environnement ».

## 6. Références

- [1] N.S. Boulton, Analysis of data from pumping tests in unconfined anisotropic aquifers, *J. Hydrol.* 10 (1970) 369-378.
- [2] N.S. Boulton, J.M.A. Pontin, An extended theory of delayed yield from storage applied to pumping tests in unconfined anisotropic aquifers, *J. Hydrol.* 14 (1971) 53-65.
- [3] M. Detay, P. Poyet, Y. Emsellem, A. Bernardi, G. Aubrac, Development of the saprolite reservoir and its state of saturation: influence on the hydrodynamic characteristics of drillings in crystalline basement (in French), *C. R. Acad. Sci. Paris II* 309 (1989) 429-436.
- [4] C. Engerrand, Hydrogéologie des socles cristallins fissures à fort recouvrement d'altérites en régime de mousson : étude hydrogéologique de deux bassins versants situés en Andhra-Pradesh (Inde), Thèse de doctorat Université Paris VI, 2002.
- [5] A.C. Gringarten, P.A. Witherspoon, A method of analysing pump test data from fractured aquifers, in: I.A.o.R. Mehan. (Ed.), *Percolation through fissured rock*, Deutsche Gesellschaft für Red and Grundbau, Stuttgart, 1972, pp. T3B1-T3B8.
- [6] A.C. Gringarten, H.J. Ramey, Unsteady-state pressure distribution created by a well with a single horizontal fracture, partially penetrating or restricted entry, *Trans. Am. Inst. Min. Eng.* 257 (1974) 413-426.
- [7] P. Lachassagne, S. Ahmed, C. Golaz, J.C. Maréchal, D. Thiery, F. Touchard, R. Wyns, A methodology for the mathematical modelling of hard-rock aquifers at catchment scale based on the geological structure and the hydrogeological functioning of the aquifer, XXXI IAH Congress, Munich, in: K.-P. Seiler and S. Wohnlich (Ed.), *New approaches characterising groundwater flow*, A.A. Balkema Publishers, 2001, pp.367-370.
- [8] P. Lachassagne, R. Wyns, P. Bérard, T. Bruel, L. Chéry, T. Coutand, J.F. Desprats, P. Le Strat, Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones, *Ground Water* 39(4) (2001) 568-581.
- [9] P. Migon, K. Lidmar-Bergström, Deep weathering trough time in central and northwestern Europe: problems of dating and interpretation of geological record, *Catena* 49 (2002) 25-40.
- [10] P. Migon, M.F. Thomas, Grus weathering mantles-problems of interpretation, *Catena* 49 (2002) 5-24.
- [11] S.P. Neuman, Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table, *Water Resources Research* 8(4) (1972) 1031-1045.

- [12] S.P. Neuman, Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water Resources Research* 11(2) (1975) 329-342.
- [13] Y. Tardy, C. Roquin, *Dérive de continents, paléoclimats et altérations tropicales*. Editions du BRGM, Orléans, 1998.
- [14] R. Taylor, K. Howard, A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda, *Hydrogeology Journal* 8(3) (2000) 279-294.
- [15] R. Wyns, L'utilisation des paléosurfaces continentale en cartographie probabiliste, *Géologie de la France* 3 (1991) 1-10.
- [16] R. Wyns. PRD324. Hydrogéologie des aquifères discontinus. Ressources en eau Margeride Ouest. Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central), in : Rapport BRGM R40191 (1998), Orléans, France, 18 p., 9 figures, 4 planches.
- [17] R. Wyns, Climat, eustatisme, tectonique : quels contrôles pour l'altération continentale ? Exemple des séquences d'altération cénozoïques en France, *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris* 39(2) (2002) 5-16.
- [18] R. Wyns, J.C. Gourry, J.M. Baltassat, F. Lebert, Caractérisation multiparamètres des horizons de subsurface (0-100 m) en contexte de socle altéré, 2ème Colloque GEOFCAN, BRGM, IRD, UPMC, (1999) 105-110.
- [19] R. Wyns, J.M. Baltassat, P. Lachassagne, A. Legchenko, J. Vairon, F. Mathieu, Application of Magnetic Resonance Soundings to Groundwater Reserves Mapping in Weathered Basement Rocks (Brittany, France), *Bull. Soc. géol. France*, sous presse.

### **Légendes des figures**

Figure 1 : Profil d'altération typique au sein de roches de socle (les épaisseurs données correspondent au cas de l'étude).

Figure 2 : (a) photographie d'un puits ouvert (dugwell) dans un granite à biotite altéré sur le site de Maheshwaram. (b) identification des différents horizons, fractures horizontales et diaclases.

Figure 3: Ajustements des rabattements dans les puits d'observation IFP-1/1 et IFP-1/2 au moyen des courbes théoriques de Neuman de type A et B.

Figure 4: Coupe géologique des puits IFP-1 et IFP-9 (1: sols et arènes, 2: zone fissurée, 3: granite sain) et profils de flux radiaux lors d'un essai d'injection. Identification des fractures hydrauliquement efficaces. ( $Q_{inj}$  : débit lors de l'essai d'injection et des mesures au micro-moulinet. Le niveau d'eau indiqué sur la figure correspond au niveau rabattu lors de l'injection).

### **Figures**

Figure 1

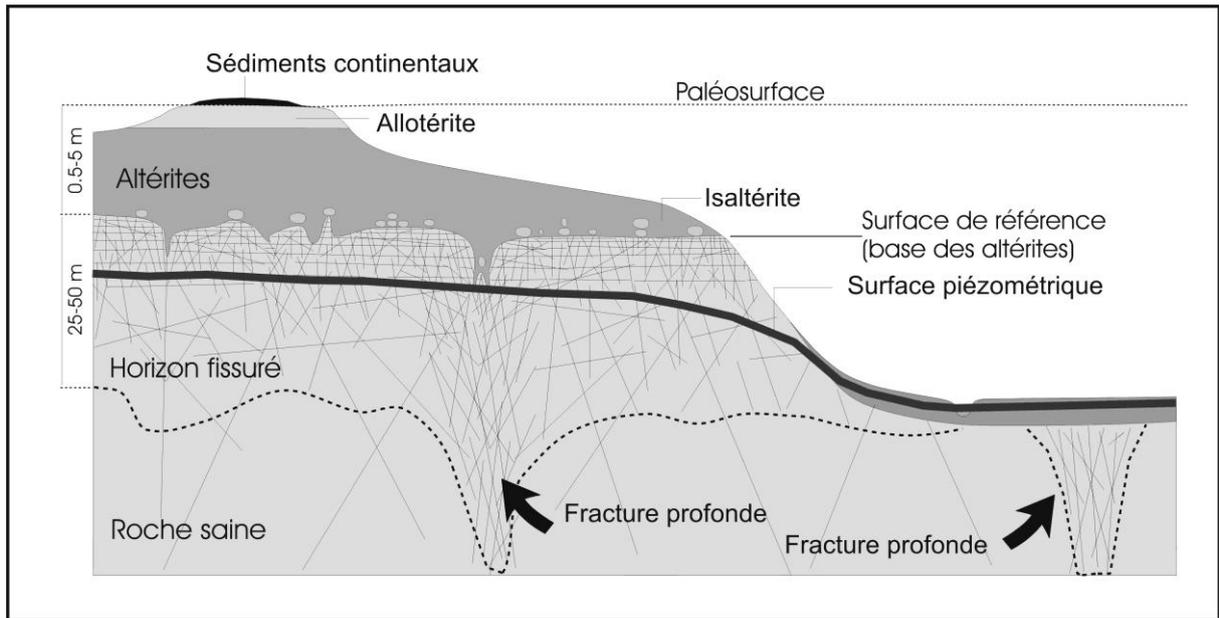


Figure 2

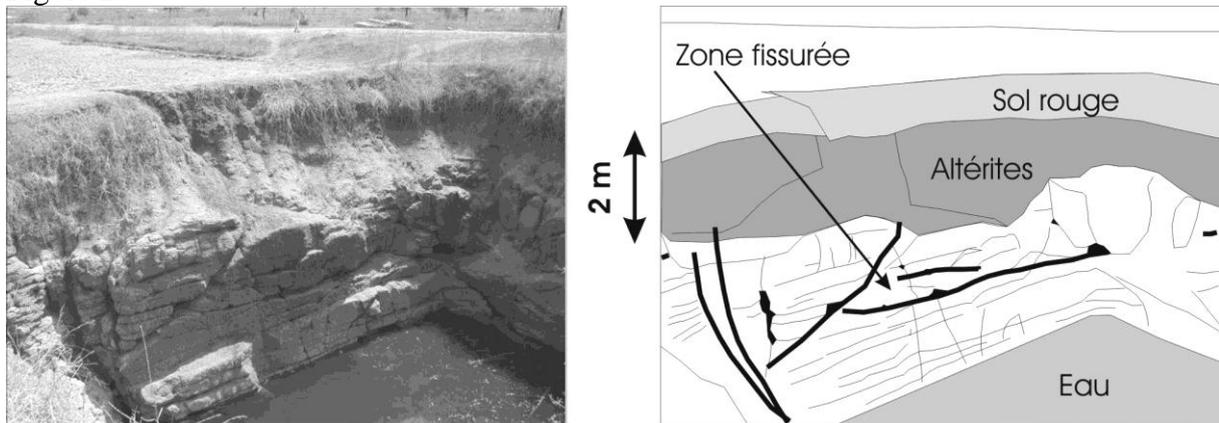


Figure 3

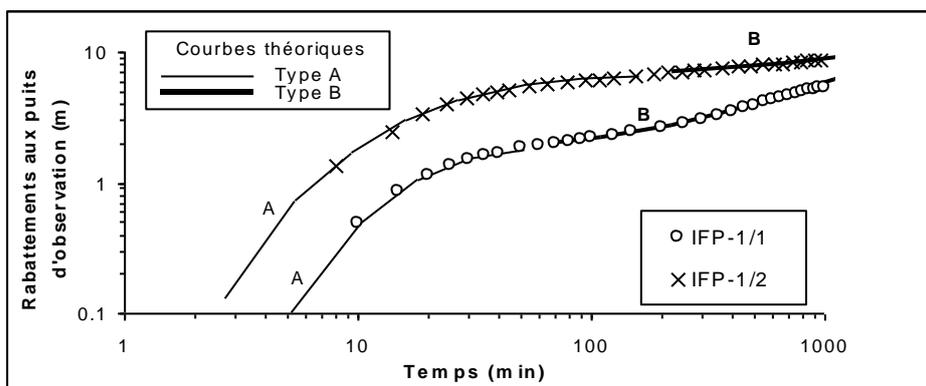
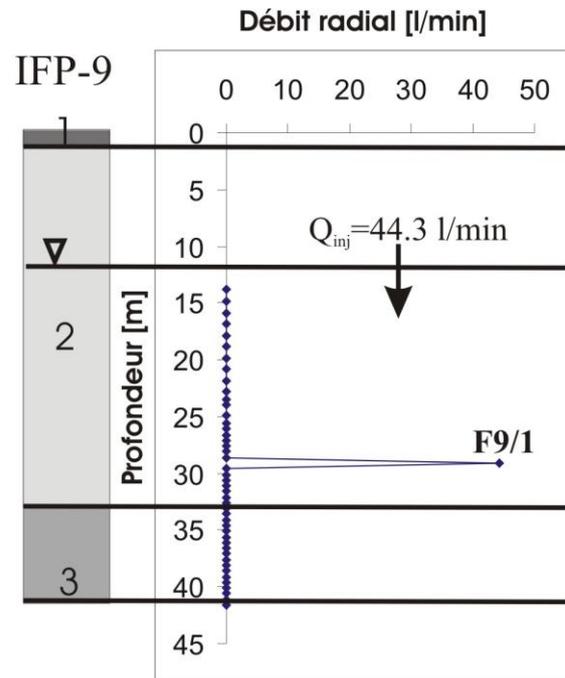
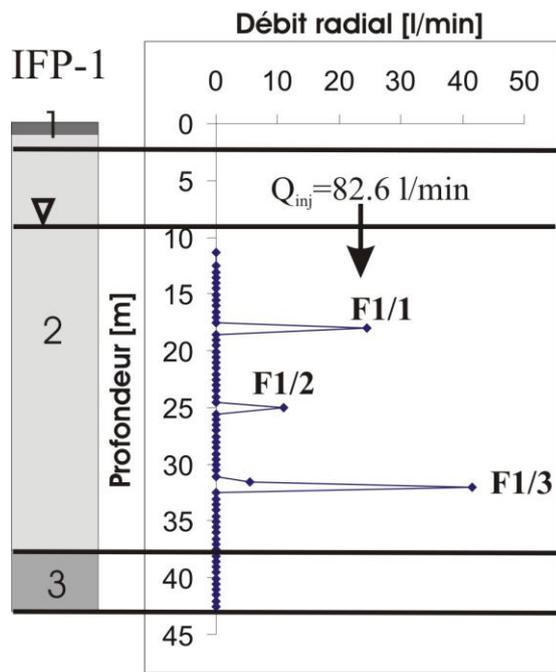


Figure 4



## Tableaux

Puits d'observation	Puits de pompage	$r$ (m)	$T_A$ (m <sup>2</sup> /s)	$T_B$ (m <sup>2</sup> /s)	$T_A/T_B$ (-)	$T_{AB}$ (m <sup>2</sup> /s)	$S$ (-)	$S_y$ (-)
IFP-1/1	IFP-1	28	1.76E-05	1.96 <sup>E</sup> -05	0.90	1.86E-05	7.0E-05	1.7E-03
IFP-1/2	IFP-1	27.5	1.71E-05	1.76 <sup>E</sup> -05	0.97	1.74E-05	3.7E-05	1.5E-03
IFP-9/1	IFP-9	30.7	5.55E-04	7.65 <sup>E</sup> -04	0.73	6.51E-04	7.1E-04	3.4E-03

Tableau I : transmissivités et paramètres d'emmagasinement obtenus par ajustements des rabattements ( $T_A$  : transmissivité obtenue par ajustement sur la courbe de type A,  $T_B$  : transmissivité obtenue par ajustement sur la courbe de type B,  $T_{AB}$  : moyenne géométrique de  $T_A$  et  $T_B$ ).

Puits d'observation	$\beta$ (-)	$r$ (m)	$b$ (m)	$K_r$ (m/s)	$K_z$ (m/s)	$K_D$ (-)	$1/K_D$ (-)
IFP-1/1	1.00	28	21.8	8.5E-07	5.2E-07	0.606	1.7
IFP-1/2	0.20	27.5	21.8	8.0E-07	1.0E-07	0.126	8.0
IFP-9/1	0.60	30.7	7.3	9.0E-05	3.0E-06	0.034	29.5

Tableau II : perméabilités et degré d'anisotropie déterminés aux puits d'observation par la méthode de Neuman

Puits	Paramètres connus					Paramètres déterminés par l'ajustement				
	$H$ (m)	<i>Fissure</i>	$z_f$ (m)	$z_f/H$ (-)	$S_s^*$ (1/m)	$H_{DG}$ (-)	$r_f$ (m)	$K_r$ (m/s)	$K_z$ (m/s)	$K_r/K_z$ (-)
IFP-1	21.8	F1/3	6.0	0.28	2.5E-06	3	30.4	3.5E-06	1.9E-07	18.7
IFP-9	7.3	F9/1	4.0	0.55	9.7E-05	5	3.4	2.9E-05	5.2E-06	5.5

Tableau III : perméabilités, degré d'anisotropie et rayon de la fracture horizontale déterminés aux puits de pompage par la méthode de Gringarten (\* :  $S_s$  est la moyenne des coefficients d'emmagasinement spécifiques déterminés aux puits d'observation par la méthode de Neuman).