



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 451–460



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, Inde

<sup>b</sup> BRGM, Service cartographie, unité « Modélisation et Applications », 3, av. Claude-Guillemain, 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, Inde

Reçu le 10 avril 2003 ; accepté le 29 avril 2003

Présenté par Ghislain de Marsily

### 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 est 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 sub-horizontales dues au processus d'altération sur celle des fractures sub-verticales d'origine tectonique. *Pour citer cet article : J.-C. Maréchal et al., C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Vertical anisotropy of hydraulic conductivity in fissured layer of hard-rock aquifers due to the geological structure of weathering profiles.** Pumping tests carried out in the fissured layer of a granitic hard-rock aquifer, interpreted at the observation wells by means of the analytical solution of Neuman and at the pumping wells with that of Gringarten show the existence of a strong vertical anisotropy of this layer of the aquifer; the horizontal permeability is clearly and systematically higher than the vertical one. These results agree perfectly with the geological observations, the fissured layer of the weathered granite profile showing the existence of many sub-horizontal fissures. It confirms that, within the fissured layer, the permeability of sub-horizontal fissures due to the weathering process dominates over that of sub-vertical fissures of tectonic origin. *To cite this article: J.-C. Maréchal et al., C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [marchal@ngri.res.in](mailto:marchal@ngri.res.in) (J.-C. Maréchal).

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

*Keywords*: weathering; hard rock; horizontal fracture; India; anisotropy; pumping test; granite

## Abridged English version

### 1. Introduction

Hard rock aquifers generally occupy the first 100 metres of crystalline rocks from the top [3,14] that have been subjected to weathering processes [18, 19]. The classical weathering profile comprises the following layers, which have specific hydrodynamic properties, from top to bottom (Fig. 1):

- a weathering cover, with a thickness of 0 to 5 m; this layer has high porosity and low permeability. When saturated, it constitutes the reserve of the aquifer;
- fissured zone, constituted by fractured hard rock, with a depth-decreasing density of fractures; these fractures result from the weathering process itself [18,19]: the weathering of micaceous minerals induces expansion and cracks in the rock (in granite, for example, the fractures are parallel to the topography during the weathering phase); this layer provides the transmissive function in the aquifer;
- a solid basement, permeable only locally, where deep tectonic fractures are present.

When the spatial distribution of these layers with their hydrodynamic properties is understood, methodologies can be developed both for the assessment of groundwater resources and modelling of groundwater flow at the catchment scale [15,16,19].

The objective of this paper is to determine the coherence between geological observations and hydrodynamic properties of the aquifer, especially the anisotropy of permeability in the fissured zone.

### 2. Weathering profile

The Maheshwaram watershed located 30 km south of Hyderabad (India) is the main study area of the Indo-French Centre for Groundwater Research (French Geological Survey/National Geophysical Research Institute). Granites constitute the basement of the whole

basin and the weathering profiles are easily observable through many dug wells used by the farmers for irrigation (Fig. 2). Under a few decimetres of red soils, the weathered layers with a thickness of 0 to 5 m cover the fissured zone. A high density of horizontal fractures is observed in the fissured zone, as illustrated by the picture in Fig. 2. Vertical fractures with a tectonic origin are also present. Due to the strong exploitation of groundwater resources, water levels are far below ground level and the weathered layers are dry, while only the fissured zone is saturated. This allows us to specifically test this layer through pumping tests.

### 3. Vertical anisotropy of the fissured zone

Two pumping tests were carried out at constant discharge rates. Drawdowns in observation wells are interpreted by the Neuman [12] method, while drawdowns in the pumping wells are analysed using the theory of the horizontal fracture developed by Gringarten [5].

#### 3.1. Neuman method at observation wells

The theory initially developed by Boulton [1] to interpret some unusual drawdown curves obtained in the observation wells (see Fig. 3) takes into account the notion of “delayed yield from storage in unconfined aquifers” [2]. It was improved by Neuman [11, 12], who developed an analytical solution adapted to anisotropic unconfined aquifers where  $K_r$  is the radial permeability parallel to the aquifer extension and  $K_z$  is the vertical permeability. The Neuman solution, available as an abacus, gives reduced drawdowns in an observation well located at a radial distance  $r$  from the pumping well,  $s_{DN} = 4\pi T/Q$ , as a function of:

- reduced time  $t_s = T t / S r^2$  for type-A curves;
- reduced time  $t_y = T t / S_y r^2$  for type-B curves;

where  $T$  is the transmissivity of the aquifer,  $S$  the storage coefficient,  $S_y$  the specific yield,  $t$  the time since the start of pumping. The application of this method consists in fitting the observed drawdowns on the abacus made of two types of curves: type-A curve for short times and type-B curve for late times (Fig. 3).

Both curves are characterised by the same parameter  $\beta = r^2 K_D/b^2$ , which is a function of the permeability anisotropy  $K_D = K_z/K_r$ , the thickness of the aquifer  $b$  and the distance  $r$  between the observation and the pumping wells.

The application of this method (Table 1) to the observation wells IFP-1/1, IFP-1/2 and IFP-9/1 leads to the evaluation of transmissivities, storage coefficients ( $S$ ) and specific yields ( $S_y$ ). The results are consistent with other observations and methods of interpretation. The determination of  $K_D$  requires the knowledge of the aquifer thickness  $b$ . Flowmeter measurements during injection tests in eight wells of the catchment have shown that the solid basement does not contain any conductive fracture (Fig. 4). Thus, the top of the solid basement was chosen as the bottom of the aquifer. With this assumption, the anisotropy ratio and the permeability can be computed and are given in Table 2. The results show a horizontal permeability 2 to 30 times higher than the vertical one. This result is consistent with the observation of horizontal fractures in dug wells.

### 3.2. Gringarten method at pumping wells

Vertical flowmeter profiles in wells IFP-1 and IFP-9 (Fig. 4) show that a few fractures are conductive, respectively three in F1/1, F1/2 and F1/3 and one in F9/1. Actually, at IFP-1, only the deepest one was saturated during the whole pumping test. Similarly, the only conductive fracture crossed by IFP-9 was also saturated during the pumping test. Moreover, the analysis by Neuman's method shows the existence of anisotropy due to horizontal fractures. Thus, the method developed by Gringarten [5,6] for a vertical well crossing a horizontal fracture in an anisotropic aquifer, applicable to the pumping well, is well adapted to the hydrogeological context of the IFP-1 and IFP-9 wells.

The interpretation is done through the fitting of observed drawdowns on theoretical curves of an abacus [5] giving the reduced drawdown in a pumping well for a fracture located at the centre of the aquifer, as a function of the reduced time. Knowing the geometry of the case (i.e. the thickness  $H$  of the aquifer), assuming the distance  $z_f$  between the bottom of the aquifer and the fracture to be  $0.5 H$  and using the value determined with Neuman's method for  $S_s$ , the hydrodynamic properties of the aquifer are evaluated (Table 3):

$K_r$  the horizontal permeability,  $K_z$  the vertical permeability and the radius  $r_f$  of the horizontal fracture. With this method, an anisotropy of the aquifer is also shown in the pumping wells, with a horizontal/vertical ratio on the order of 5 to 20.

## 4. Conclusion

The geological observations on the granites of the Maheshwaram watershed (India) confirm the existence, as in many other areas of the World, of a high density of horizontal fractures in the fissured zone of the weathering profile. Measurements made with a flowmeter confirm that only a few of these fractures are conductive. The interpretation of pumping tests on several wells with observation wells regularly shows the existence of a vertical anisotropy of permeability: the horizontal permeability is 2 to 30 times higher than the vertical permeability. These results confirm the major influence of fissures with a weathering origin on the hydraulic parameters of hard-rock aquifers, whereas fissures with a tectonic origin have a less important role. The application of the Gringarten theory also makes it possible to determine the radius of horizontal fractures crossing the pumping wells.

## 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 saprolites) 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

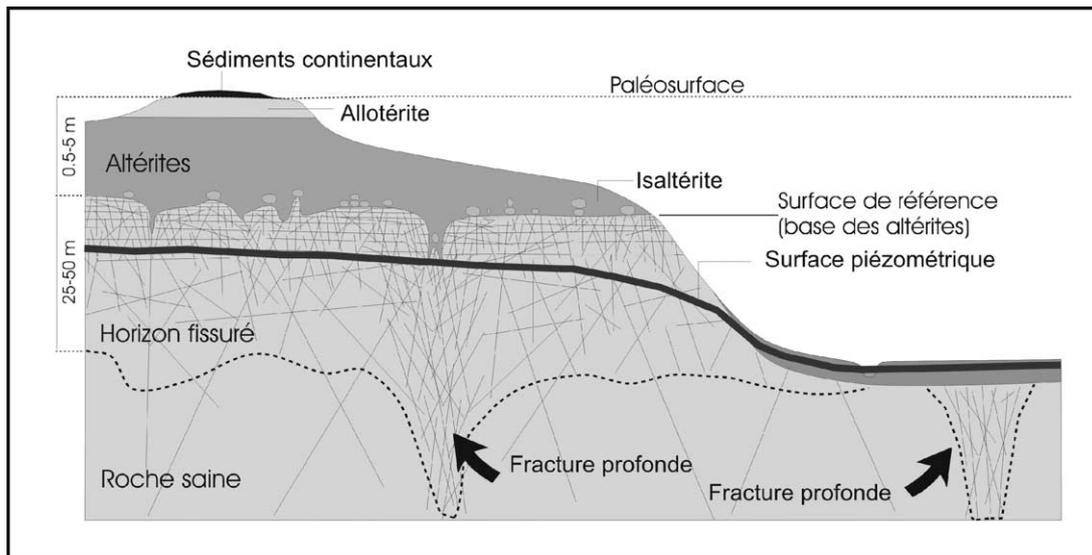


Fig. 1. Profil d'altération typique au sein de roches de socle (les épaisseurs données correspondent au cas de l'étude).

Fig. 1. Geological cross-section of a typical weathering profile in a hard-rock aquifer (thickness corresponds to the case study).

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 sub-horizontaux, 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 déterminées 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

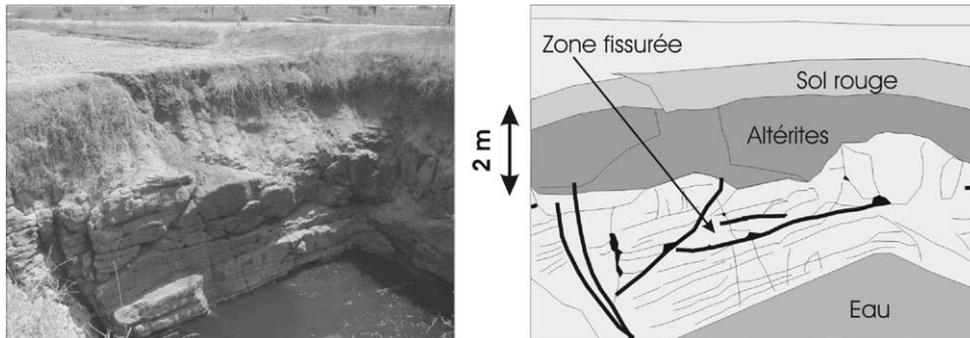


Fig. 2. (a) Photographie d'un puits ouvert (*dugwell*) dans un granite à biotite altéré sur le site de Maheshwaram. (b) Identification des différents horizons, fractures horizontales et diaclases.

Fig. 2. (a) Picture of a dugwell in the Maheshwaram area, in biotite-bearing granite. (b) Identification of various layers, horizontal fractures and diaclases.

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, en revanche, 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 (CEFIRE) d'Hyderabad (Inde).

Le bassin versant étudié autour du village de Maheshwaram, situé à 30 km 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 m. Une forte densité de fissures sub-horizontales est observée dans la zone fissurée, comme l'illustre 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 pompes 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 do-

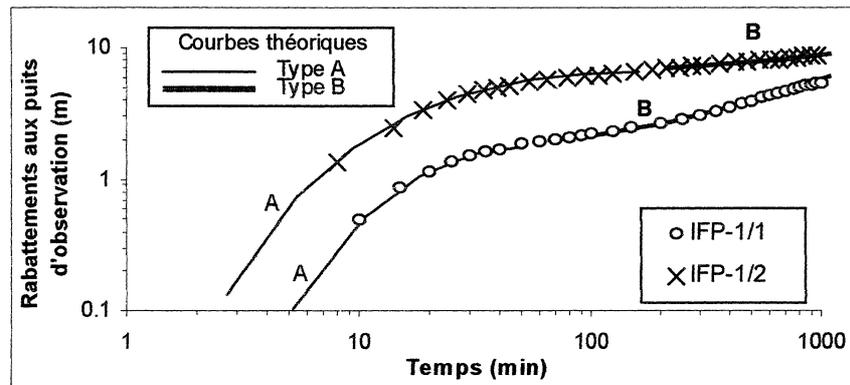


Fig. 3. Ajustements des rabattements dans les puits d'observation IFP-1/1 et IFP-1/2 au moyen des courbes théoriques de Neuman de type A et B.

Fig. 3. Fitting of drawdown in observation wells IFP-1/1 and IFP-1/2 using Neuman's theoretical curves of types A and B.

Tableau 1

Transmissivités et paramètres d'emmagasinement obtenus par ajustement 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  $T_B$ )

Table 1

Transmissivity and storage parameters obtained by fitting of drawdown ( $T_A$  : transmissivity obtained by fitting on type A curve,  $T_B$  : transmissivity obtained by fitting on type B curve,  $T_{AB}$  : average of  $T_A$  and  $T_B$ )

Puits d'observation	Puits de pompage	$r$ (m)	$T_A$ ( $m^2 s^{-1}$ )	$T_B$ ( $m^2 s^{-1}$ )	$T_A/T_B$ (-)	$T_{AB}$ ( $m^2 s^{-1}$ )	$S$ (-)	$S_y$ (-)
IFP-1/1	IFP-1	28	$1,76 \times 10^{-5}$	$1,96 \times 10^{-5}$	0,90	$1,86 \times 10^{-5}$	$7,0 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-3}$
IFP-1/2	IFP-1	27,5	$1,71 \times 10^{-5}$	$1,76 \times 10^{-5}$	0,97	$1,74 \times 10^{-5}$	$3,7 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-3}$
IFP-9/1	IFP-9	30,7	$5,55 \times 10^{-4}$	$7,65 \times 10^{-4}$	0,73	$6,51 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-4}$	$3,4 \times 10^{-3}$

minante sub-horizontale) 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 h), 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 aux puits ont été analysés au moyen de la méthode de la fracture horizontale de Gringarten [5,6].

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

À titre d'exemple, sur un diagramme bi-logarithmique (Fig. 3), les courbes de rabattements ob-

servés aux puits d'observation IFP-1/1 et IFP-1/2, lors de l'essai de pompage au puits IFP-1 (voir Tableau 1 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 hori-

zontale 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'emmagasinement 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,  $s_{DN} = 4\pi T s/Q$  en fonction :

- du temps réduit  $t_s = T t/S r^2$  pour les courbes de type A ;
- du temps réduit  $t_y = T t/S_y r^2$  pour les courbes de type B ;

où  $T$  désigne la transmissivité de l'aquifère,  $S$  le coefficient d'emmagasinement,  $S_y$  la porosité de drainage,  $t$  le temps depuis le début du pompage et  $s$  le rabattement. Le principe de la méthode de Neuman repose sur un ajustement des rabattements observés aux temps courts sur une courbe théorique de type A (décompression 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  $\beta = r^2 K_D/b^2$ , où  $b$  désigne l'épaisseur initiale saturée de l'aquifère et  $K_D = K_z/K_r$  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 1, 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'emmagasinement ( $S$ ) 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 ( $K_D$ ) dépend 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 dans le Tableau 2, indiquent une anisotropie du tenseur de perméabilité, en accord avec les observations géologiques : la perméabilité horizontale est systématiquement supérieure à la perméabilité verticale, d'un facteur allant de 2 à 30, 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 m 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 m 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 unique en milieu de perméabilité anisotrope, applicable aux puits de pompage, est donc adaptée à la configuration hydrogéologique des puits IFP-1 et IFP-9.

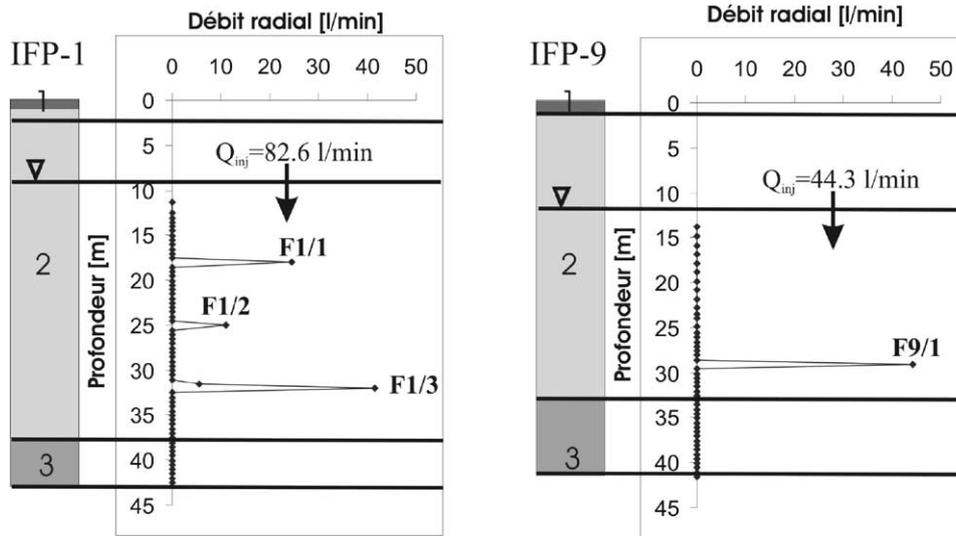


Fig. 4. Coupe géologique des puits IFP-1 et IFP-9 (1 : sols et arènes, 2 : zone fissurée, 3 : granite sain) et profils de flux radiaux lors d'un essai d'injection. Identification des fractures hydrauliquement efficaces. ( $Q_{inj}$  : débit lors de l'essai d'injection et des mesures au micro-moulinet.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

Fig. 4. Geological profile of wells IFP-1 and IFP-9 (1: soil and weathering cover, 2: weathered-fissured zone, 3: fresh basement) and vertical profiles of radial fluxes during an injection test. Identification of conductive fractures. ( $Q_{inj}$ : discharge rate during injection and flowmeter tests. Water table indicated on the figure corresponds to the level modified in the well by the injection).

Tableau 2

Perméabilités et rapport d'anisotropie déterminés aux puits d'observation par la méthode de Neuman

Table 2

Permeability and anisotropy ratio at observation wells using Neuman's method

Puits d'observation	$\beta$ (-)	$r$ (m)	$b$ (m)	$K_r$ ( $m s^{-1}$ )	$K_z$ ( $m s^{-1}$ )	$K_D$ (-)	$1/K_D$ (-)
IFP-1/1	1,00	28	21,8	$8,5 \times 10^{-7}$	$5,2 \times 10^{-7}$	0,606	1,7
IFP-1/2	0,20	27,5	21,8	$8,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	0,126	8,0
IFP-9/1	0,60	30,7	7,3	$9,0 \times 10^{-5}$	$3,0 \times 10^{-6}$	0,034	29,5

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

$$t_{DG} = K_r t / S_s r_f^2, \quad s_{DG} = \frac{4\pi \sqrt{K_r K_z} r_f s}{Q} \quad \text{et}$$

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

où  $z_f$  désigne la distance entre la fracture et la base de l'aquifère,  $H$  l'épaisseur de l'aquifère,  $K_r$  la per-

méabilité dans la direction radiale parallèle à la fracture, qui 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

Tableau 3

Perméabilités, rapport 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 spécifique déterminés aux puits d'observation par la méthode de Neuman)

Table 3

Permeability, anisotropy ratio and radius of the horizontal fracture determined at the pumping wells using Gringarten's method (\* :  $S_s$  is the average of specific storage coefficient determined for each site using Neuman's method at observation wells)

Puits	Paramètres connus					Paramètres déterminés par l'ajustement				
	$H$ (m)	Fissure	$z_f$ (m)	$z_f/H$ (-)	$S_s^*$ ( $m^{-1}$ )	$H_{DG}$ (-)	$r_f$ (m)	$K_r$ ( $m s^{-1}$ )	$K_z$ ( $m s^{-1}$ )	$K_r/K_z$ (-)
IFP-1	21,8	F1/3	6,0	0,28	$2,5 \times 10^{-6}$	3	30,4	$3,5 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-7}$	18,7
IFP-9	7,3	F9/1	4,0	0,55	$9,7 \times 10^{-5}$	5	3,4	$2,9 \times 10^{-5}$	$5,2 \times 10^{-6}$	5,5

(moyenne de  $2,5 \times 10^{-6}$  à IFP-1/1 et IFP-1/2 et  $9,7 \times 10^{-5}$  à IFP-9), il est possible d'estimer le rayon de la fracture ainsi que les perméabilités horizontales et verticales de l'aquifère (Tableau 3).

Dans les deux cas, l'anisotropie verticale est évidente, avec des facteurs de l'ordre de 5 à 20, tandis que les rayons de fracture estimés (de 3 à 30 m) 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 sub-verticales. Les mesures au micro-moulinet confirment qu'une faible fraction seulement de ces structures est hydrauliquement active.

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 joue un rôle subordonné à cette échelle.

#### 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 étrangères 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» et d'un financement du CEFIPRA (Centre franco-indien pour la promotion de la recherche avancée).

#### 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, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 309 (1989) 429–436 (in French).
- [4] C. Engerrand, Hydrogéologie des socles cristallins fissures a fort recouvrement d'altérites en régime de mousson : étude hydrogéologique de deux bassins versants situés en Andhra-Pradesh (Inde), thèse, université Paris-6, 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. T31–T38.
- [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, in : K.-P. Seiler, S. Wohnlich (Eds.), *New approaches characterising groundwater flow*, Proc. XXXIst IAH Congress, Munich, 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 Resour. Res.* 8 (4) (1972) 1031–1045.
- [12] S.P. Neuman, Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water Resour. Res.* 11 (2) (1975) 329–342.
- [13] Y. Tardy, C. Roquin, *Dérive de continents, paléoclimats et altérations tropicales*, Éditions du BRGM, Orléans, 1998.
- [14] R. Taylor, K. Howard, A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda, *Hydrogeol. J.* 8 (3) (2000) 279–294.
- [15] R. Wyns, L'utilisation des paléosurfaces continentales 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), 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, in : 2<sup>e</sup> Colloque GEOFCAN, BRGM, IRD, UPMC, 1999, pp. 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).