

## EAUX SOUTERRAINES

# Nouveaux outils et méthodes pour gérer et protéger la ressource en eau souterraine des régions de socle

P. Lachassagne\*, J.C. Maréchal\*\*\* actuellement\*, Sh. Ahmed\*\*, B. Dewandel\*\*\*, J.M. Gandolfi\*\*\*, N.S. Krishnamurthy\*\*, K. Subrahmanyam\*\*, R. Wyns\*\*\*\*

\* BRGM - Service EAU - Unité « évaluation de la ressource, milieux discontinus » (EAU/RMD)  
1039, rue de Pinville - 34000 Montpellier.

Tél. : 33-4 67 15 79 73 - E-mail : p.lachassagne@brgm.fr, jc.marechal@brgm.fr

\*\* NGRI, Centre franco-indien de recherche sur les eaux souterraines (CEFIREs)

NGRI, Uppal Road, 500007 Hyderabad, Inde. www.ifcgr.org

Tél. : 91-40 23 43 46 57 - E-mail : ahmed@ngri.res.in, krishnamurthy@ngri.res.in ; subrahmanyam@ngri.res.in

\*\*\* BRGM/EAU/RMD, Centre franco-indien de recherche sur les eaux souterraines (CEFIREs)

NGRI, Uppal Road, 500007 Hyderabad, Inde. www.ifcgr.org

Tél. : 91-40 23 43 46 57 - E-mail : dewandel@ngri.res.in ; gandolfi@ngri.res.in

\*\*\*\* BRGM - Service cartographie et diffusion de l'information géologique - Unité « Modélisations et Applications » (CDG/MA) BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2

Tél. : 33-2 38 64 33 91 - E-mail : r.wyns@brgm.fr

## 1. LES ROCHES DE SOCLE

Les « aquifères de socle » sont constitués de roches cristallines, d'origine plutonique (granites s.l.) et métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes, etc.). Hydrogéologiquement, il s'agit de roches dures (« hard rock »). Elles présentent ainsi, malgré des origines et des compositions très diverses, un comportement d'ensemble relativement homogène et des propriétés similaires. Elles se caractérisent principalement par une perméabilité de fissures et de fractures. Les aquifères qu'elles renferment sont donc classiquement considérés comme « discontinus », en raison de l'importante variabilité spatiale de leurs propriétés hydrodynamiques.

Ces roches constituent le soubassement de l'ensemble des continents. Elles affleurent sur de très grandes surfaces : une grande partie des continents africain, nord et sud-américain, eurasiatique, les deux tiers de l'Inde, de l'Australie, etc. En France, elles forment les massifs dits « anciens » : Massif armoricain, Massif central, Vosges et Ardennes, sont bien représentées au sein des chaînes Pyrénéenne et Alpine, y compris en Corse et dans plusieurs départements ou territoires d'outre mer.

## 2. LA RESSOURCE EN EAU DES AQUIFERES DE SOCLE : UNE IMPORTANCE MODESTE, MAIS UNE BONNE RÉPARTITION SPATIALE

Compte tenu de leurs relativement faibles perméabilité et porosité, la productivité des aquifères de

socle restera toujours modeste en comparaison de celle des autres types d'aquifères. Néanmoins, les aquifères de socle présentent l'avantage de proposer une ressource eau en général bien répartie géographiquement et peu dépendante des eaux de surface. En effet, des sites favorables à l'implantation de forages en roche de socle sont en général susceptibles d'être trouvés à l'échelle de chaque commune.

De ce fait, si en France ces ressources sont rarement concurrentielles par rapport aux eaux de surface pour les agglomérations de taille moyenne à grande, il n'en est pas de même pour les agglomérations plus réduites et en zone rurale. En outre, les aquifères de socle sont caractérisés par la présence de nombreuses sources de débordement (dans les régions tempérées), dispersées géographiquement, de faible débit, à l'origine d'un habitat très dispersé et de densités de population modérées. Il en est généralement de même dans les régions semi-arides ou arides du fait de la faible productivité des puits traditionnels et de leur nombre important.

La mise en valeur de la ressource en eau de ces aquifères sous une forme plus active que la simple « cueillette » des débits de débordement des sources ou l'« écrémage » de la nappe par des puits de gros diamètre, est donc susceptible de contribuer significativement au développement économique des régions de socle. En Europe, il s'agit souvent de renforcer les ressources existantes. Dans les pays arides à semi-arides, il s'agit aussi de contribuer au développement d'une agriculture irriguée à

forte valeur ajoutée. Dans d'autres régions, il s'agit de produire une eau de bonne qualité sanitaire en limitant les investissements ou les coûts de fonctionnement, etc.

### 3. NOUVEAUX CONCEPTS SUR LA STRUCTURE ET LE FONCTIONNEMENT DES AQUIFÈRES DE SOCLE

Les « aquifères de socle » tirent le qualificatif de « discontinu » de la nature discrète de leur perméabilité. Ainsi, lors de la réalisation d'un forage, les « venues d'eau » significatives apparaissent au sein de la roche « saine » (dure) qui n'est perméable qu'au droit de ces venues d'eau. Le modèle classique d'aquifère discontinu identifie ainsi ces venues d'eau discrètes à des fractures ouvertes, d'origine tectonique.

Cependant, la plupart des régions où affleurent les roches métamorphiques ou plutoniques sont des régions dites « stables », émergées. Les roches y présentent en général une pellicule superficielle altérée de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, qui correspond à un profil d'altération de type latéritique.

méabilité (voir figure 1). L'origine de cette fissuration était généralement attribuée à des processus de « décompression ». Cependant, on démontre maintenant que cette fracturation résulte des contraintes engendrées par le gonflement des minéraux au cours du processus d'altération, en particulier le mica noir (biotite). La fréquence des fissures ainsi générées décroît régulièrement vers le bas (voir figure 1).

Les propriétés hydrodynamiques de l'horizon fissuré ont fait l'objet d'une caractérisation de détail [Maréchal et al., 2004] (voir figure 2). Au sein des granites, parmi les nombreuses fractures subhorizontales (plusieurs dizaines au sein d'un profil d'altération) seules quelques-unes présentent une perméabilité suffisante pour constituer des « venues d'eau » significatives. D'une perméabilité voisine de  $10^{-4}$  m/s, leur extension est comprise entre 5 et 40 m environ. Des joints subverticaux, d'une perméabilité dix fois moindre en moyenne, contribuent à la connectivité du réseau. D'autres fractures de moindre perméabilité sont à l'origine d'une « perméabilité de blocs », voisine de  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s, plus forte que la perméabilité de matrice ( $10^{-14}$  à  $10^{-9}$  m/s). Ces « blocs » assurent 90% de l'emmagasinement total de l'horizon fissuré de l'aquifère, de l'ordre de 0,5 à 1%, les fractures perméables ne contribuant que pour 10% (0,05 à 0,1%) à cet emmagasinement,

– le substratum rocheux sain sous-jacent ne présente des perméabilités élevées que très localement, au droit des fractures d'origine tectonique. Il n'offre qu'une très faible capacité de stockage d'eau souterraine à l'échelle du massif (porosité efficace  $< 10^{-4}$ ).

Le développement de tels profils d'altération (altérites, horizon fissuré) requiert de longues périodes pendant lesquelles les régions concernées ne présentent qu'un relief modéré (en présence d'un relief plus accentué, l'érosion devient supérieure à l'alté-

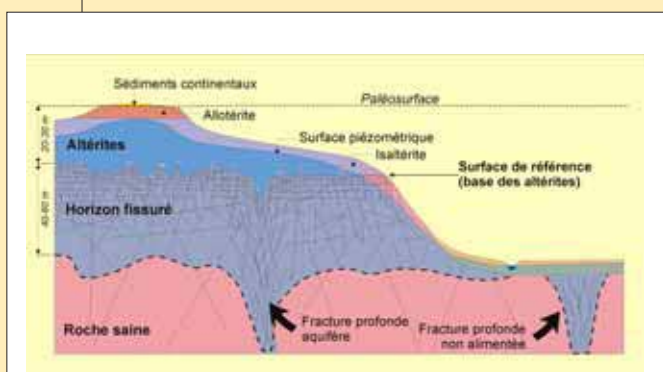


Figure 1. Modèle conceptuel stratiforme de la structure et des propriétés hydrogéologiques des aquifères de socle.

Ce sont ces profils d'altération qui confèrent aux roches de socle leurs propriétés aquifères avec, de haut en bas (voir figure 1) :

- une cuirasse ferrugineuse ou bauxitique, d'épaisseur métrique. Cet horizon induré est souvent absent (destruction par érosion),
- des altérites meubles (arènes en milieu granitique). Ces formations peu consolidées résultent d'une altération très poussée de la roche originelle. Du fait de leur teneur en argile, les altérites sont caractérisées par une relativement faible perméabilité, mais par des capacités significatives d'emmagasinement (1% à plus de 15%). Les altérites assurent une fonction de stockage des eaux souterraines,
- les travaux de recherche récents ont mis en évidence, sous cette partie meuble des profils, un « horizon fissuré », stratiforme, de 50 à 100 m d'épaisseur, auquel l'aquifère de socle doit sa per-

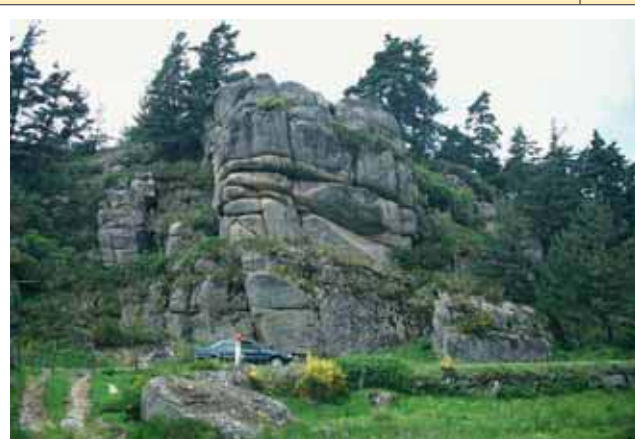


Figure 2. L'horizon fissuré-altéré (partie médiane à inférieure) au sein de granites (Margeride, Massif central français).

ration et les produits d'altération ne peuvent s'accumuler), sous un climat hydrolysant. En Europe, le Crétacé inférieur et l'Eocène inférieur et moyen, ayant duré, respectivement, environ 45 Ma et 25 Ma, constituent les périodes les plus récentes durant lesquelles l'essentiel des profils d'altération du Massif armoricain et du Massif central s'est développé, avec pour conséquence la création d'un horizon fissuré de 50 à 70 m d'épaisseur sous 20 à 30 m d'altérites meubles.

## 4. APPLICATION À LA PROSPECTION ET À LA GESTION DES AQUIFERES DE SOCLE

Les différents horizons décrits ci-dessus constituent donc un aquifère composite, dont les propriétés hydrogéologiques sont optimales dans les secteurs où les trois compartiments décrits ci-dessus sont présents et où ils combinent au mieux leurs caractéristiques hydrodynamiques respectives.

### 4.1. CARTOGRAPHIE DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DES ALTÉRITES ET DE L'HORIZON FISSURÉ

La formation de l'horizon fissuré-altéré, qui assure l'essentiel de la perméabilité de l'aquifère, est étroitement liée au développement des altérites. À l'échelle régionale, ces couches altérées sont parallèles aux paléosurfaces d'aplanissement, c'est-à-dire à la surface topographique (paléopaysage) contemporaine de l'altération. Ces paléosurfaces peuvent avoir été érodées postérieurement à la principale phase d'altération.

Sur la base de la connaissance de ces principes génétiques, il est relativement aisé de cartographier :

- l'altitude de (voir figure 1) :

- la limite entre les altérites et l'horizon fissuré, qui est facilement observable sur le terrain et donc l'épaisseur des altérites,

- la base de l'horizon fissuré, sur le principe de la connaissance de son épaisseur moyenne pour chaque type de lithologie.

La figure 3 présente un exemple d'une telle cartographie d'épaisseurs d'horizons réalisée en Lozère, sur un bassin versant d'une superficie de 700 km<sup>2</sup> [Lachassagne et al., 2001].

### 4.2. CARTOGRAPHIE DES POTENTIALITÉS EN EAU SOUTERRAINE

Les travaux d'analyse statistique des résultats de forages montrent les relations existant entre les propriétés hydrogéologiques et la lithologie. La cartographie géologique classique et la cartographie des horizons d'altération des roches de socle présentée plus haut sont donc complémentaires pour la détermination a priori des potentialités en eau souterraine des régions de socle, à petite échelle (celle de régions de quelques kilomètres carrés à plusieurs centaines voire milliers de kilomètres carrés de superficie).

Une méthode de cartographie par analyse multicritères, intégrant d'autres paramètres (niveaux piézométriques par exemple) a été développée sur cette base [Lachassagne et al., 2001; Wyns et al., 2004]. Elle autorise, à l'échelle régionale, une cartographie prévisionnelle du taux de réussite des campagnes de forage, du débit moyen des puits, etc., très utile pour la programmation de politiques d'aménagement du territoire, de campagnes d'hydraulique villageoise, etc. La figure 3 présente un exemple de cartographie déduite de ce type d'analyse multicritères.

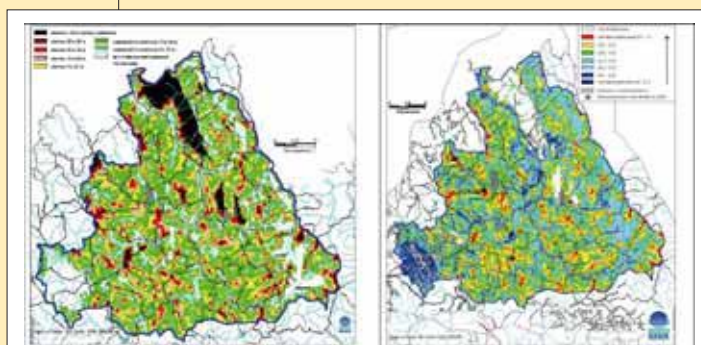
### 4.3. IMPLANTATION DES FORAGES D'EAU

Le type de cartographie présenté ci-dessus peut logiquement être utilisé pour programmer, en fonction des propriétés des différentes zones ainsi définies et des objectifs recherchés, en particulier en termes de débit des puits, les travaux à mettre en œuvre, sur le terrain, dans la perspective de l'implantation de forages d'eau.

### 4.4. EVALUATION ET GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU

L'intensification (en Europe ou en Afrique par exemple) de l'exploitation des aquifères de socle, mais aussi les surexploitations avérées dans certaines régions du monde (en Inde par exemple) requièrent, à l'image de ce qui se fait déjà pour les autres types d'aquifères la mise en œuvre d'outils de gestion de ces aquifères.

En raison de leur très forte hétérogénéité apparente, ces aquifères de socle n'avaient que rare-



**Figure 3.** Bassin versant lozérien de la Truyère (Lozère), 700 km<sup>2</sup>. Gauche : carte de l'épaisseur des altérites et de l'horizon fissuré – altéré. Droite : carte des potentialités en eau souterraine (analyse multicritères)

Carte de gauche : couleurs  
jaune, rouge, noir : épais-  
seurs croissantes d'altérites,  
vert : horizon fissuré-altéré,  
blanc : roche saine

Carte de droite : du noir au  
rouge : potentialités en eau  
souterraine croissantes

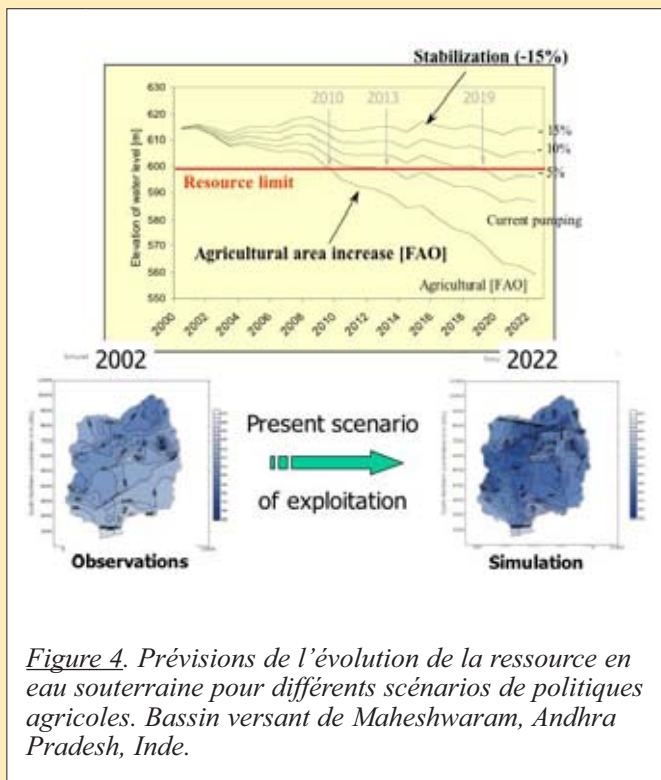


Figure 4. Prévisions de l'évolution de la ressource en eau souterraine pour différents scénarios de politiques agricoles. Bassin versant de Maheshwaram, Andhra Pradesh, Inde.

ment fait l'objet, jusqu'à présent, d'une approche à l'échelle du bassin versant, seule à même d'autoriser la gestion globale et intégrée de leur ressource en eau. Les méthodes présentées ci-dessus, permettant de cartographier la géométrie et les propriétés hydrodynamiques de ces aquifères, fournissent des éléments de base qui permettent maintenant de répondre à ces besoins. L'étude des fluctuations du niveau d'eau dans des forages dont la représentativité vis-à-vis des différents horizons constitutifs du profil d'altération est assurée à l'échelle du bassin versant, permet ainsi de quantifier les différents termes du bilan : stock d'eau présent au sein de l'aquifère, recharge annuelle, prélèvements par pompage, etc., moyennant une bonne connaissance des paramètres d'emménagement. Des techniques d'évaluation de ces paramètres à partir des fluctuations de la nappe et de la connaissance des flux entrant et sortant de l'aquifère ont été mises au point et testées

en Inde [Maréchal et al., 2005]. Ces méthodes autorisent la gestion de la ressource à l'échelle du bassin versant (voir figure 4).

La connaissance, à l'échelle du bassin versant, de la géométrie des différents compartiments constitutifs de l'aquifère ainsi que de leurs propriétés hydrodynamiques et des relations hydrauliques existant entre eux est maintenant aussi utilisée pour les modéliser au moyen de modèles mathématiques maillés multicouches (modèles aux différences finies ou aux éléments finis).

## 5. PERSPECTIVES

Les principales ambitions, pour les années à venir, de la recherche sur les aquifères de socle visent :  
 - à procéder à un nouveau changement d'échelle, afin de disposer d'outils et de méthodologies adaptés à la gestion quantitative de la ressource en eau à l'échelle d'une unité de gestion de type administratif (régions d'une superficie de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés). Il s'agira en particulier d'intégrer les techniques de télédétection, appliquées à la cartographie des horizons d'altération,  
 - fort du savoir faire acquis sur la structure et le fonctionnement des aquifères, à aborder les problèmes de qualité des eaux (fluor en Inde, etc.). ●

## RÉFÉRENCES

Lachassagne P., Wyns R., Bérard P., Bruel T., Chéry L., Coutand T., Desprats J.-F., Le Strat P. *Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones.* Ground Water, vol. 39,4, pp. 568-581(2001).

Maréchal, J.C., Dewandel B., Galeazzi L., Ahmed S. *Combining the groundwater budget and water table fluctuation methods to estimate specific yield and natural recharge in a hard-rock aquifer under semiarid conditions.* Groundwater, vol. soumis (2005).

Maréchal, J.-C., Dewandel B., Subrahmanyam K. *Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer.* Water Resources Research, vol. 40,11, pp (2004).

Wyns, R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legtchenko A., Vairon J. *Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France).* - Bulletin de la Société géologique de France, vol. 175,1, pp. 21-34 (2004).