

Le modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle altéré et ses applications pratiques

The conceptual model of hard rock aquifers and its practical applications

Lachassagne P.⁽¹⁾, Dewandel B.⁽²⁾, Wyns R.⁽³⁾

(1) Danone Waters, Evian-Volvic-World, BP 87, 74500 Evian-les-Bains Cedex, (2) BRGM, D3E/NRE

(3) BRGM-ISTO, UMR 7327, BP 36009, 45060 Orléans cedex02

patrick.lachassagne@danone.com, b.dewandel@brgm.fr, r.wyns@brgm.fr

I. INTRODUCTION

Les roches de socle (« hard rocks » en anglais), ou roches cristallines, sont les roches plutoniques et métamorphiques (Lachassagne *et al.*, 2014a). Ces roches se caractérisent notamment par une très faible perméabilité de matrice (inférieure à 10^{-8} m/s). Ainsi, les granites (*s.l.*) ont originellement de très faibles porosité et perméabilité primaires ; les roches métamorphiques, quant à elles, ont perdu les éventuelles caractéristiques hydrodynamiques des roches originelles, du fait du métamorphisme. Les marbres sont exclus des roches de socle car ils peuvent être karstiques. Il en est de même des roches « dures » telles que les roches volcaniques, les calcaires, etc., dont les déterminismes des paramètres hydrodynamiques sont différents de ceux des roches de socle.

Les roches de socle constituent le sous-sol des continents et affleurent sur plus de 20% des terres émergées non englacées, principalement dans les régions tectoniquement stables telles que les vieux cratons : 40% de l'ensemble du continent africain, notamment en Afrique de l'Ouest (près de 50%), respectivement 24 et 21% pour l'Amérique du Sud et du Nord, 45% pour l'Inde, une grande partie de l'Australie et près de 20% en Europe.

Il a été démontré (Cho *et al.*, 2003, Lachassagne *et al.*, 2011) que, même si les roches plutoniques et métamorphiques sont très différentes les unes des autres, particulièrement en termes de minéralogie, de pétrofabrique ou de texture, elles présentent des propriétés hydrogéologiques similaires. Comme le démontrent et le présentent en détail Wyns *et al.* (2015) au sein des actes de la conférence, ces propriétés hydrodynamiques, et notamment le développement d'une perméabilité de fractures, sont principalement dues aux processus d'altération. En effet, la plupart des roches de socle du monde sont ou ont été exposées à des processus d'altération supergène. Ces processus géologiques requièrent notamment l'émersion des roches considérées, de l'eau météorique, du temps (plusieurs Millions d'années - Ma - à dizaines de Ma) et un taux d'érosion inférieur à la vitesse de propagation de l'altération. Il en résulte des profils d'altération d'épaisseur pluridécimétrique à hectométrique, lorsqu'ils ne sont pas partiellement ou totalement érodés. Il a aussi été démontré (Lachassagne *et al.*, 2011) que les autres hypothèses invoquées pour expliquer la perméabilité des roches de socle (fracturation tectonique, décompression, fissures de refroidissement...) ne sont pas pertinentes.

En complément de l'article de Wyns *et al.* (2015) présenté au sein des actes de la conférence, nous détaillerons, au sein du présent article, la structure des aquifères de socle, qui résulte des processus d'altération, les modalités de cartographie de la géométrie et des propriétés de ces aquifères, des éléments sur leur fonctionnement hydrogéologique et les principales applications pratiques qui découlent de ces structure et modalités de fonctionnement, en hydrogéologie et en géologie appliquée.

II. STRUCTURE HYDROGEOLOGIQUE DES AQUIFERES DE SOCLE

La perméabilité des roches de socle résulte des processus d'altération (voir notamment Wyns *et al.*, 2015). Les zones perméables sont situées principalement au sein de l'horizon fracturé/fissuré, stratiforme,

subhorizontal (parallèle à la paléotopographie contemporaine du processus d'altération), de quelques dizaines à cent ou deux cents mètres d'épaisseur, qui se trouve immédiatement sous les altérites meubles (allotérites et isaltérites) (Figure 1). Dans une moindre mesure (Figure 3), les zones perméables se trouvent aussi, sur quelques mètres de largeur, à la périphérie fracturée et altérée parallèle aux discontinuités géologiques qui préexistaient avant l'altération (contacts lithologiques, joints, dykes, filons, etc.).

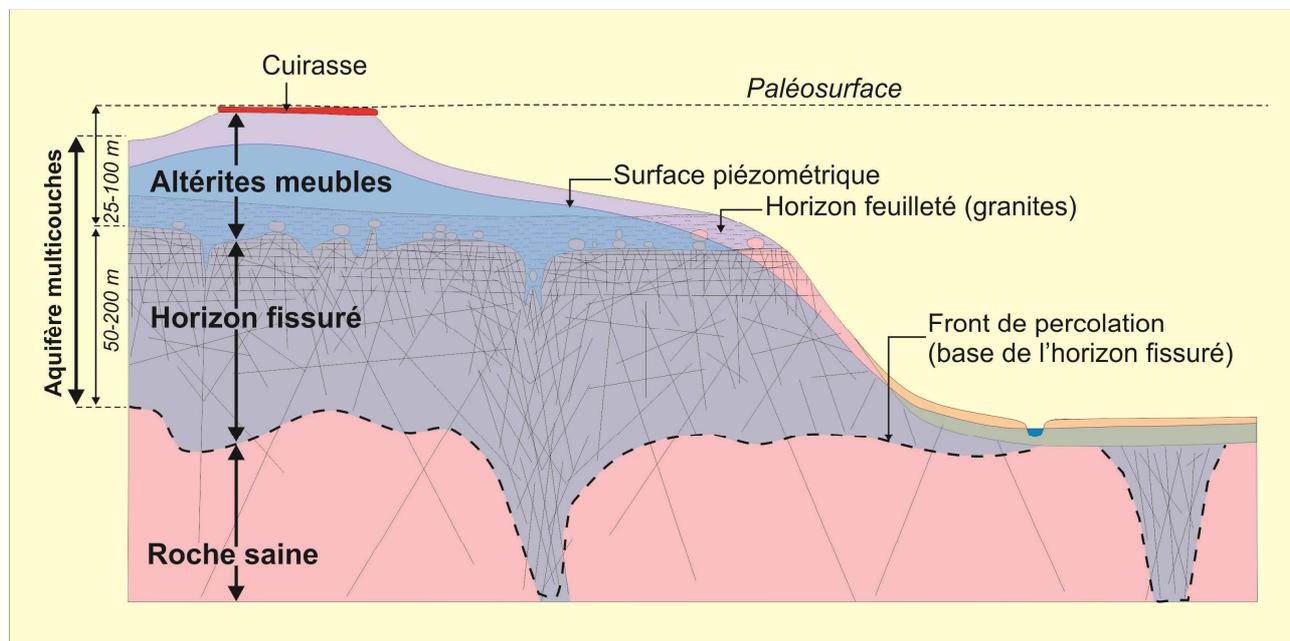


Figure 1 – Modèle conceptuel d'un paléo profil d'altération de roches de socle (de type granitique) partiellement érodé (modifié de Wyns 1998)

II. 1 Horizon fissuré stratiforme

Un profil d'altération typique (Figure 1) comprend les couches décrites ci-dessous qui, lorsqu'elles sont saturées en eau, constituent un aquifère composite avec, de haut en bas (Dewandel *et al.*, 2006 ; pour une description géologique et minéralogique détaillée, on se référera à Wyns *et al.*, 2015) :

- la cuirasse ferrallitique ou bauxitique, d'épaisseur métrique (jusqu'à près de 10 m localement), mais qui peut être absente, du fait de l'érosion ou de sa désagrégation. Lorsqu'elle existe, la cuirasse présente fréquemment des fractures de largeur centimétrique, dont le remplissage peut être partiellement ou totalement érodé par les écoulements d'eau d'infiltration. La cuirasse peut donner naissance à de petits aquifères perchés, les altérites meubles jouant alors le rôle d'imperméable relatif. Des sources, présentant localement un comportement de type épikarstique, en constituent fréquemment l'exutoire. Ces aquifères sont principalement observés en contexte tropical humide – à saisons contrastées - (Guyane, zone guinéenne de l'Afrique de l'Ouest) ;
- les altérites meubles (saprolite) qui peuvent être décrites en deux sous-unités avec, de haut en bas, les allotérites, à dominante argileuse et au sein desquelles la structure originelle de la roche initiale n'est plus visible, et les isaltérites, qui ont conservé leur structure originelle. Cette distinction est principalement applicable aux roches paradérivées, la structure originelle du granite étant souvent conservée jusqu'en haut des altérites, ou « arènes », des granites. Au sein des roches grenues, la base des isaltérites prend un aspect feuilleté. La saprolite présente une relativement faible perméabilité (environ 10^{-6} m/s pour un granite). Elle peut atteindre une porosité relativement élevée, jusqu'à 5 à 30%, tout particulièrement au sein des granites grossiers. Là où elle est saturée en eau, la saprolite assure la fonction capacitive de l'aquifère composite. Au sein des roches à grains fins ou à faible teneur en quartz (schistes par exemple), cet horizon est principalement argileux et de très faible perméabilité ;
- l'horizon fissuré est caractérisé par une fracturation dense dans ses premiers mètres et une décroissance de la densité des fractures avec la profondeur (Figure 2). La connectivité des fractures

et, par conséquent, la perméabilité en grand de l'horizon fissuré, décroissent ainsi rapidement vers le bas (Guihéneuf *et al.*, 2014). Dans les granites ou les roches foliées verticalement, ces fractures sont majoritairement subhorizontales. Dans les roches métamorphiques, leur orientation est anarchique. L'horizon fissuré assure la fonction transmissive de l'aquifère composite et c'est lui qui est capté dans la plupart des forages des régions de socle, qui sont en général verticaux. Lorsque la couverture d'altérites meubles est partiellement ou totalement érodée, ou non saturée, l'horizon fissuré peut assurer tout ou partie de la fonction capacitive de l'aquifère (Wyns *et al.*, 2004). Les propriétés hydrodynamiques de l'horizon fissuré sont décrites en détail dans l'article de Maréchal *et al.* (2015) présenté au sein des actes de la conférence. Notons néanmoins que, pour des raisons variées (variations spatiales de leur ouverture, colmatage...), sur les plusieurs dizaines de fractures observées verticalement au sein d'un horizon fissuré, seules 1 à 5 (voire zéro dans le cas d'un forage « sec ») présentent une perméabilité significative et rendent le forage exploitable. Par ailleurs, on montre que les fractures subhorizontales perméables des granites présentent une extension spatiale (un « diamètre ») de quelques dizaines de mètres environ ;

- le socle sain est perméable seulement localement (voir ci-dessous). A l'échelle du bassin versant, et pour des applications de ressources en eau, il peut être considéré comme imperméable en grand et d'emmagasinement négligeable.

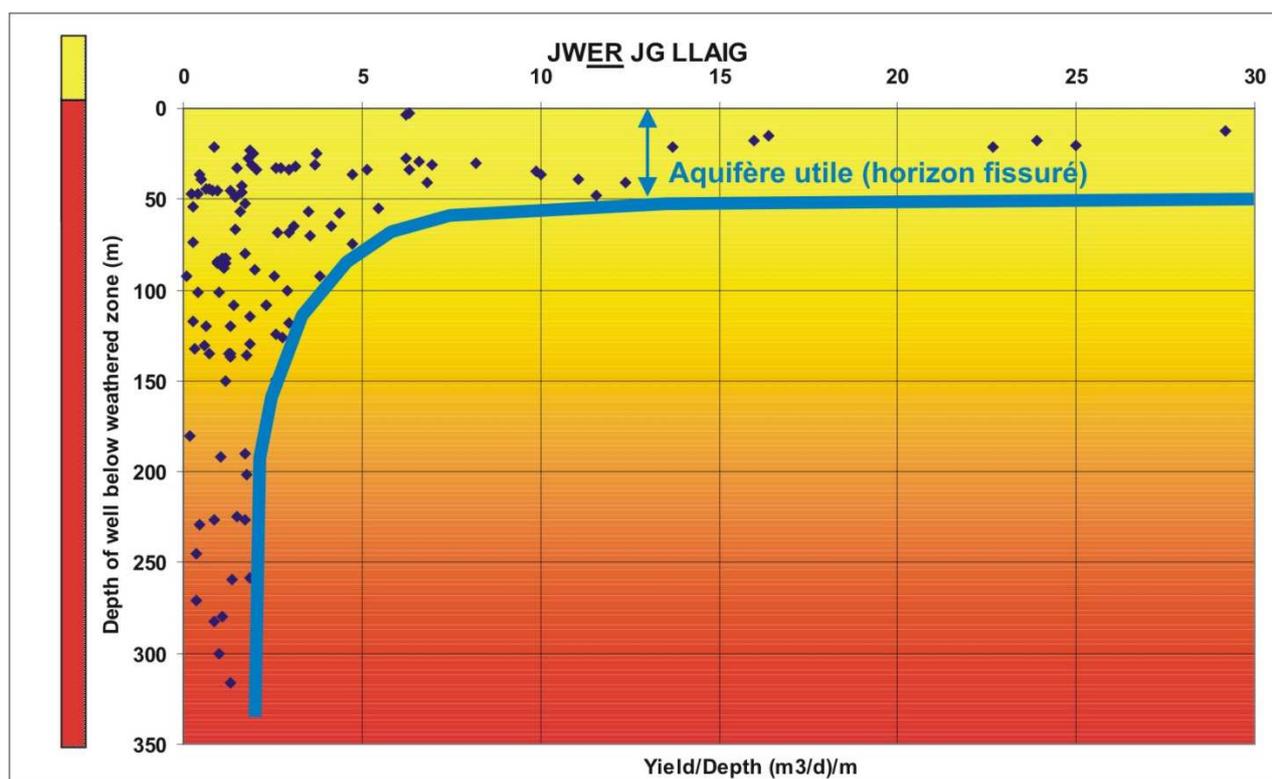


Figure 2 – Distribution verticale de la « perméabilité » sous la base des altérites meubles (« 0 » de l'axe des ordonnées) pour des granites jurassiques altérés de Corée du Sud (Source : Cho *et al.*, 2003). En abscisse : débit linéaire des forages = débit au soufflage des forages / profondeur du forage sous la base des altérites meubles (m³/j/m). En ordonnée : profondeur du forage sous la base des altérites meubles (m)

Les profils d'altération sont souvent plus complexes que la présente description, en raison par exemple de phases successives d'altération et d'érosion (profils polyphasés ; voir par exemple Dewandel *et al.*, 2006) ou, notamment au sein des roches métamorphiques, du fait des variations lithologiques au sein de la roche mère (altération différentielle).

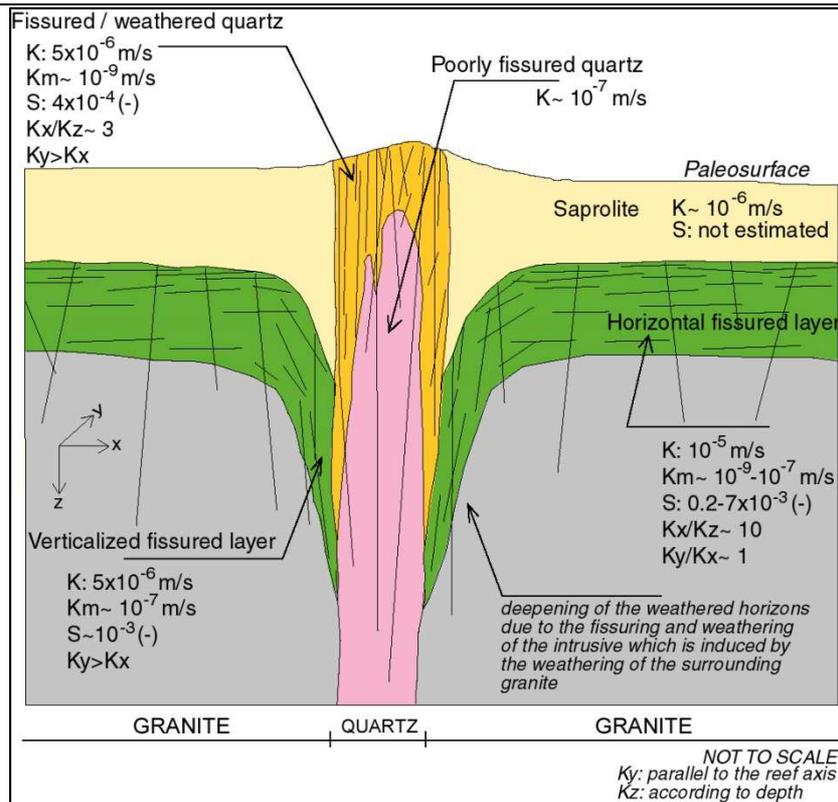


Figure 3 – Modèle conceptuel et paramètres hydrodynamique d'une discontinuité subverticale altérée (filon de quartz) au sein de roches de socle (Source : Dewandel et al., 2011)

II. 2 Horizon fissuré subvertical à la périphérie des discontinuités

Les discontinuités qui affectent la roche mère (contacts lithologiques, joints, dykes, filons, etc., souvent subverticaux) constituent des lieux privilégiés de propagation de l'altération vers le bas (cf. Wyns et al., 2015 ; Dewandel et al., 2011). Il en résulte notamment le développement de fractures perméables, sur quelques mètres de largeur, à la périphérie de la discontinuité ou du filon, dont l'extension verticale peut largement dépasser la centaine de mètres de profondeur (Figure 3).

Dans les régions où l'horizon fissuré stratiforme a été érodé ou n'est pas saturé en eau (niveau piézométrique profond, inférieur à la partie la mieux connectée de l'horizon fissuré), ces discontinuités subverticales peuvent constituer une alternative à l'horizon fissuré stratiforme pour l'implantation des forages d'eau. Dans la mesure des moyens de forage disponibles, compte tenu de leur fort pendage, il est préférable de les forer au moyen de forages inclinés, afin notamment de ne pas traverser exclusivement le cœur de la discontinuité qui est souvent complètement argilisé.

II. 3 L'aquifère de socle

Il résulte de la configuration la plus générale (horizon fracturé stratiforme), un **aquifère composite** dont l'horizon fracturé assure la fonction transmissive et les altérites meubles sus-jacentes, avec des porosités efficaces pouvant dépasser 5%, la fonction capacitive. Ce modèle conceptuel unifie les données et observations géologiques et hydrogéologiques sur les milieux de socle réalisées principalement depuis le milieu du XXe siècle, notamment (i) la diminution des fractures perméables avec la profondeur et leur disparition (et non leur « fermeture sous l'effet des contraintes ») quelques dizaines de mètres sous la base des altérites meubles, (ii) le fait que la majorité de ces fractures ne sont pas subverticales, ce qui permet notamment leur captage par des forages qui, eux, sont majoritairement verticaux, (iii) la présence, quasi ubiquiste, de fractures perméables alors que les fractures tectoniques actives sont rares, notamment au sein des vieux cratons, etc..

Ce type d'aquifère a ainsi été décrit et caractérisé sous toutes les latitudes (Europe, jusqu'en Norvège incluse, Afrique, Inde, Corée, Amérique du Nord et du Sud, etc.). De plus amples détails sur les processus

d'altération, mais aussi concernant l'influence de la minéralogie, de la texture et de la structure de la roche initiale sur le développement de l'horizon fissuré sont détaillés au sein de l'article de Wynn *et al.* (2015), présenté au sein des actes de la conférence.

III. CARTOGRAPHIE DES AQUIFERES DE SOCLE

Décrits tel que précédemment, les aquifères de socle peuvent être considérés comme des aquifères stratiformes, continus, liés aux profils d'altération. En étudiant les modalités de mise en place et d'érosion de ces derniers, il est possible de cartographier (ou de modéliser géométriquement en 3-D) la géométrie (altitude, épaisseur) et, ensuite, les propriétés physiques, des différentes couches constitutives de l'aquifère, la saprolite et l'horizon fissuré. En fonction des données disponibles, la méthodologie de cartographie (Figure 4) est basée sur tout ou partie des approches suivantes :

- géomorphologie : identification des paléosurfaces d'altération et du modelé du relief, différent entre altérites meubles et horizon fissuré, voire roche saine, sur cartes topographiques ou à partir d'un modèle numérique de terrain ;
- géologie : caractérisation des lithologies favorables (minéralogie/structure/texture des roches parentes) et des faciès d'altération sur affleurements ou à partir des données de forages. Ainsi, notamment, la base des altérites meubles est en général très bien décrite dans les bases de données de forages ;
- géophysique, de terrain ou aéroportée, avec calibration sur données de forage ou affleurements ;
- hydrodynamique : identification de la profondeur de l'horizon fissuré (toit et mur) à partir de celle des premières et dernières venues d'eau identifiées en forage.

La Figure 5 présente l'exemple d'un tel travail de cartographie réalisé, principalement à partir d'observations sur affleurements, à l'échelle d'un bassin versant d'environ 730 km². Ce type de cartographie a déjà été réalisé depuis l'échelle d'un pays dans son ensemble, en combinant principalement approches géologique, géomorphologique et base de données de forages (voir par exemple Courtois *et al.*, 2009 pour un travail mené au Burkina Faso avec plus de 15.000 forages), jusqu'à l'échelle locale (cf. arrière-plan de la Figure 8, tiré d'une étude réalisée à l'échelle du village de Cacao en Guyane ; Courtois *et al.*, 2003).

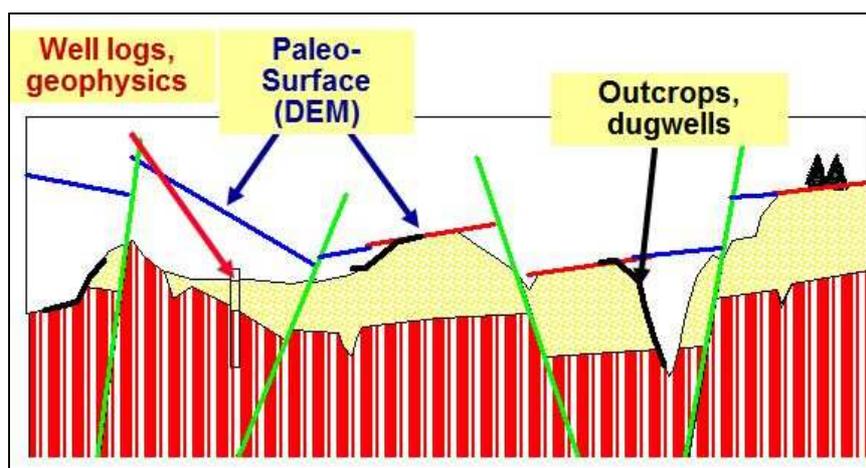


Figure 4 - Méthodologie et données utilisées pour cartographier les différents horizons constitutifs des aquifères de socle. En jaune : altérites meubles et horizon fissuré. Bandes verticales : socle sain. Outcrop = affleurement ; Dugwell = puits de gros diamètre avec roche visible (Source : Lachassagne *et al.*, 2014a)

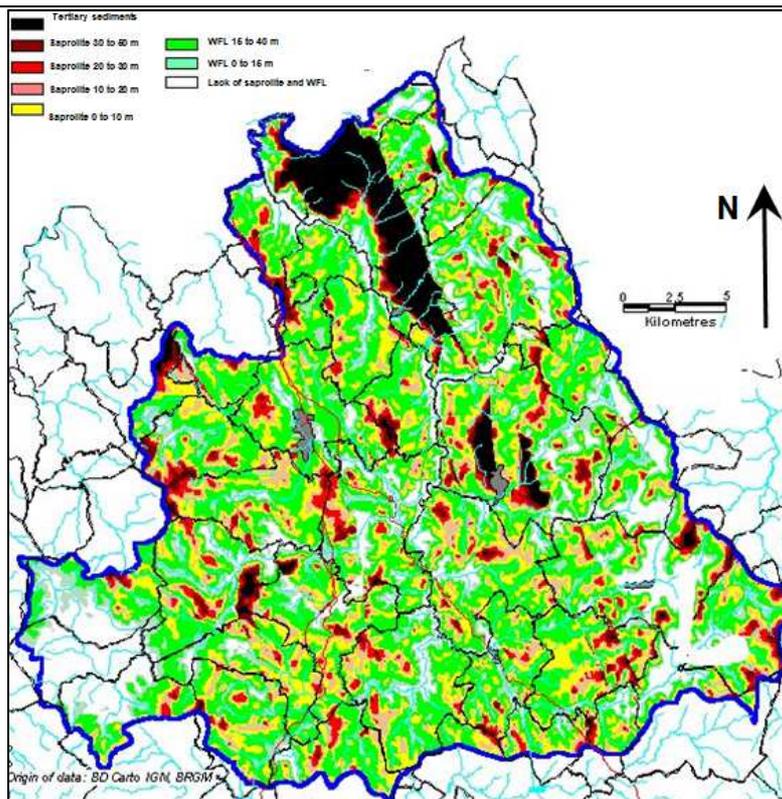


Figure 5 – Exemple de cartographie de l'épaisseur résiduelle des altérites meubles (épaisseur décroissante du noir au jaune en passant par le rouge) et de l'horizon fissuré (vert). Blanc : socle sain. Bassin versant lozérien de la Truyère, France (Source : Lachassagne et al., 2014a). Les vallées les plus profondes atteignent le granite sain. Celui-ci affleure aussi largement en Aubrac (sud-ouest de la zone d'étude) où il a été érodé par la calotte glaciaire quaternaire

IV. FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES DE SOCLE

Dans les régions bien arrosées (régions tempérées d'Europe, régions tropicales humides...) et en l'absence de prélèvement par pompage, du fait de leur faible perméabilité en grand, les aquifères de socle « débordent » sur une grande partie de leur superficie, tout particulièrement dans les dépressions topographiques. Il en résulte une multitude de « sources » et le caractère drainant du chevelu hydrographique. Cela se traduit aussi par une bonne concordance géométrique entre bassins versants topographique et souterrain. Compte tenu de la faible perméabilité et de la porosité efficace modeste de ces milieux, le débit des sources et le débit spécifique d'étiage des cours d'eau est faible (de quelques fractions de L/s, à quelques L/s tout au plus). Dans ce contexte de relations eaux souterraines – eau de surface généralisées, la plupart des lignes de courant suivent la topographie et, par conséquent, les flux principaux rejoignent rapidement les eaux de surface ; les flux circulant jusqu'à l'horizon fissuré (et/ou jusqu'aux discontinuités subverticales) sont proportionnellement beaucoup plus faibles. On observe alors une « stratification » hydrochimique des eaux souterraines, avec une augmentation de la minéralisation de haut en bas et des temps de transit moyens augmentant eux aussi avec la profondeur.

La mise en exploitation, par pompage au sein de l'horizon fissuré, de ce type de système hydrogéologique modifie drastiquement les conditions d'écoulement des eaux souterraines, en prélevant des eaux « anciennes » au sein de l'horizon fissuré et en conduisant à leur renouvellement, par « drainage » verticale descendante, par des eaux récentes provenant des altérites meubles sus-jacentes. Cela se traduit par un abaissement du niveau piézométrique au sein de la saprolite qui va être compensé par la recharge en saison des pluies et, *in fine*, par une augmentation de la recharge aux dépens des écoulements rapides de subsurface. Dans les régions où la surexploitation a très fortement abaissé le niveau piézométrique, les écoulements de surface peuvent être réduits à quelques jours par an, consécutifs aux épisodes pluvieux de forte intensité.

Les zones relativement pentues (versants des reliefs) de ces régions bien arrosées (cf. partie à la plus forte pente de la Figure 1) correspondent fréquemment à un horizon fissuré subaffleurant, voire, dans certains cas, à la roche saine non fissurée, surmontés tout au plus de quelques mètres de saprolite récente (saprolite plus récente que la saprolite du profil ancien et dont le mur suit de ce fait la topographie actuelle). Il en résulte, en saison des pluies, une saturation en eau des sols quasiment jusqu'à la surface, du fait de la faible perméabilité du sous-sol et de la faible connectivité des fractures de l'horizon fissuré, lorsqu'il existe. Dans ce contexte, les sources pérennes en toute saison et de débit significatif correspondent en général à l'intersection, avec la topographie, de discontinuités subverticales telles que celles décrites sur la Figure 3, plus ou moins perpendiculaires au versant, qui drainent le massif rocheux. Dans les régions arides ou semi-arides, les niveaux piézométriques peuvent être très bas naturellement. Dans les cas extrêmes, la décharge des systèmes hydrogéologiques est limitée à des prélèvements par les végétaux, notamment par des phréatophytes implantés le long du réseau hydrographique.

V. APPLICATIONS OPERATIONNELLES

La révélation de ce modèle conceptuel hydrogéologique et le développement des méthodes de cartographie décrites plus haut ont ouvert de larges perspectives appliquées et ont amélioré la fiabilité de l'hydrogéologie et de la géologie appliquées en contexte de roches de socle.

V. 1 Implantation des forages d'eau et cartographie des potentialités en eau souterraine

Ainsi, à l'échelle régionale ou nationale, notamment lorsqu'une base de données de forages est disponible (cf. Courtois *et al.*, 2009 par exemple), il est possible de cartographier d'une part l'épaisseur résiduelle (lorsqu'ils sont partiellement érodés) des différents horizons constitutifs des profils d'altération (saprolite, horizon fissuré) et, d'autre part, les variations spatiales de l'épaisseur (Figures 6 et 7) et des propriétés hydrodynamiques de l'horizon fissuré. Ces variations résultent soit de l'importance de l'altération subie, soit de la lithologie. On montre ainsi et en général (cf. Wyns *et al.*, 2015) que les roches les plus riches en biotite et à la granulométrie la plus élevée présentent les plus fortes perméabilités.

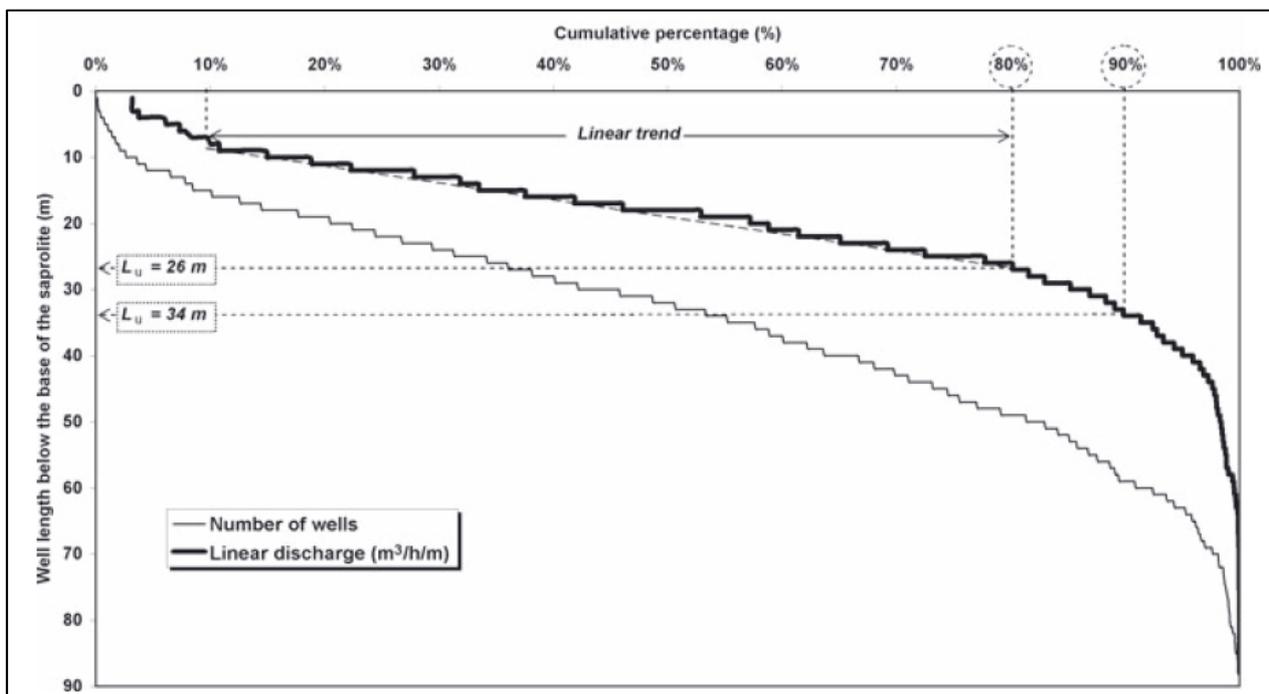


Figure 6 – Evaluation statistique de l'épaisseur de l'horizon fissuré (ici 30 m environ) pour un granite à biotite porphyrique (904 forages – Burkina Faso). Abscisse : profondeur totale du forage sous la base des altérites meubles. Ordonnée : débit linéaire des forages (cf. Figure 2) cumulé et nombre cumulé de forages, exprimés en % (Source : Courtois *et al.*, 2009)

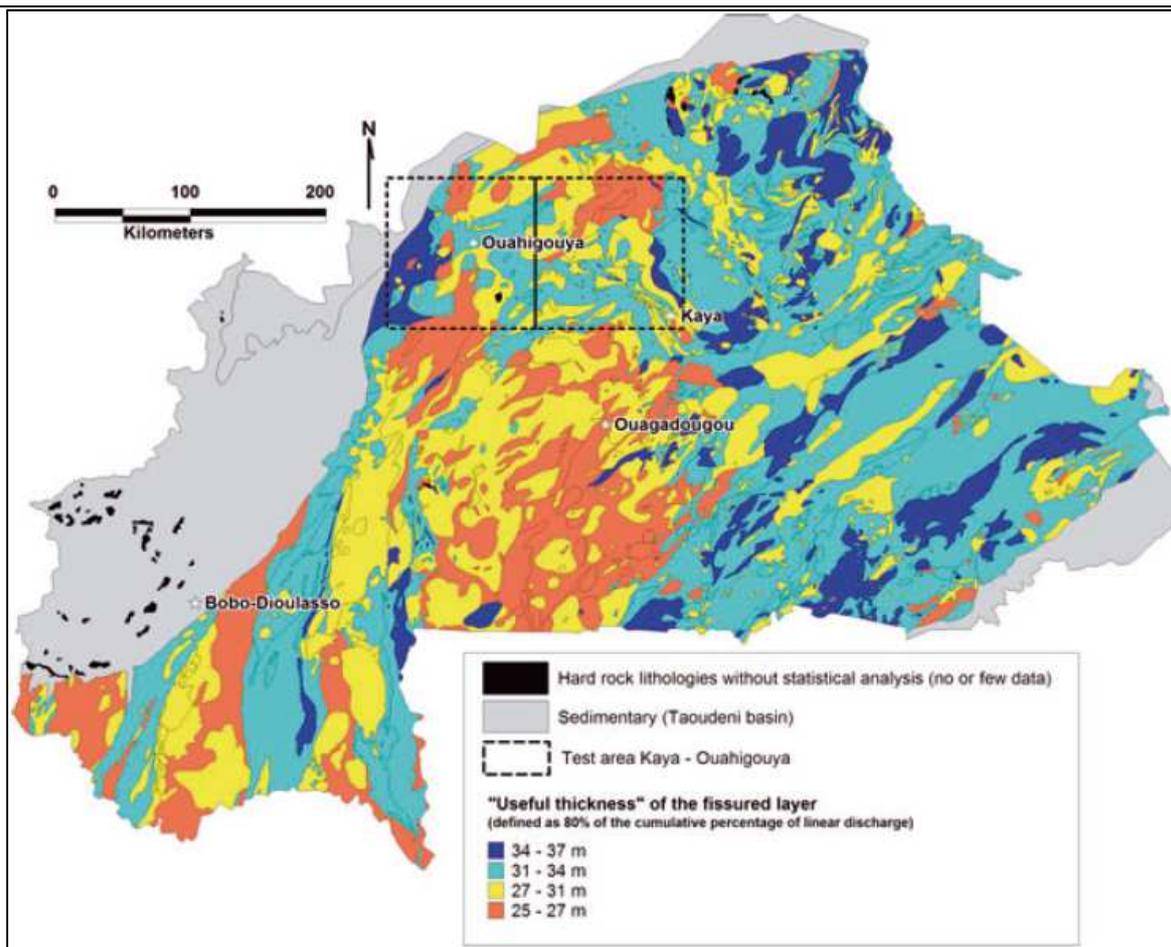


Figure 7 – Cartographie de l'épaisseur utile de l'horizon fissuré des aquifères de socle du Burkina Faso (Source : Courtois et al., 2009)

Ce type de carte est destiné à l'aménagement du territoire en identifiant les potentialités en eau souterraine. Il permet par exemple de définir a priori et statistiquement le taux de succès de nouvelles campagnes de forage, pour un débit de coupure donnée, le nombre de forages nécessaire pour l'alimentation en eau d'une population donnée, la profondeur moyenne utile des forages à réaliser, etc., et donc de faire des prévisions sur les caractéristiques et le coût de campagnes de recherche d'eau.

A l'échelle locale (Figure 8), la cartographie haute résolution permet d'identifier les différents types d'horizons fissurés en présence, y compris des discontinuités subverticales, leur plus ou moins bonne préservation, et d'implanter des forages d'eau en conséquence. Faute d'affleurements ou de forages existants en quantité suffisante, cette cartographie haute résolution peut s'appuyer sur des méthodes géophysiques, méthodes électriques 2-D notamment. Inversement, elle permet de contribuer à la calibration de la géophysique.

V. 2 Autres applications locales en hydrogéologie et géologie appliquée

A l'échelle locale, la bonne connaissance des profils d'altération et de leurs propriétés hydrodynamiques trouve de nombreuses applications en dehors des ressources en eau *sensu-stricto* (Figure 8) :

- implantation de carrières, là où la découverte de saprolite sera la moins importante et où le matériau constitutif de l'horizon fissuré ou sous-jacent aura les meilleures propriétés mécaniques ;
- implantation de décharge sur les saprolites lithologiquement les moins perméables et/ou dont les horizons les moins perméables (allotérites) sont les mieux préservés, au droit d'horizons fissurés peu productifs et en tout état de cause non exploités (forages, sources) ;
- caractérisation des risques de mouvements de terrain ;

- définition de la faisabilité et des moyens de creusement à mettre en œuvre pour des ouvrages linéaires : autoroutes, voies ferrées, réseaux enterrés... ;
- évaluation du débit d'exhaure et des impacts en surface de tunnels : tarissement de sources, débit d'étiage des cours d'eau (Lachassagne *et al.*, 2014b) ;
- etc..

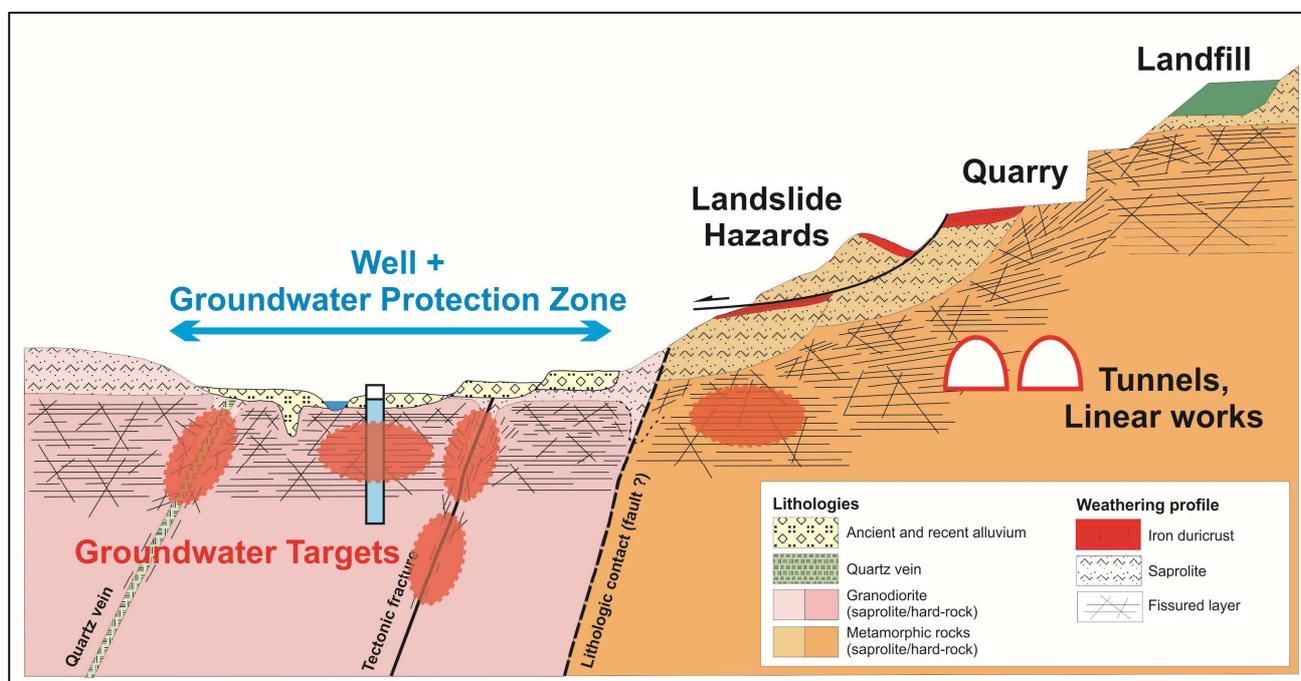


Figure 8 – Diverses applications d'une cartographie haute résolution des profils d'altération à l'échelle locale (Source : Lachassagne *et al.*, 2014 et Courtois *et al.*, 2003)

V. 3 Gestion et modélisation de la ressource en eau souterraine

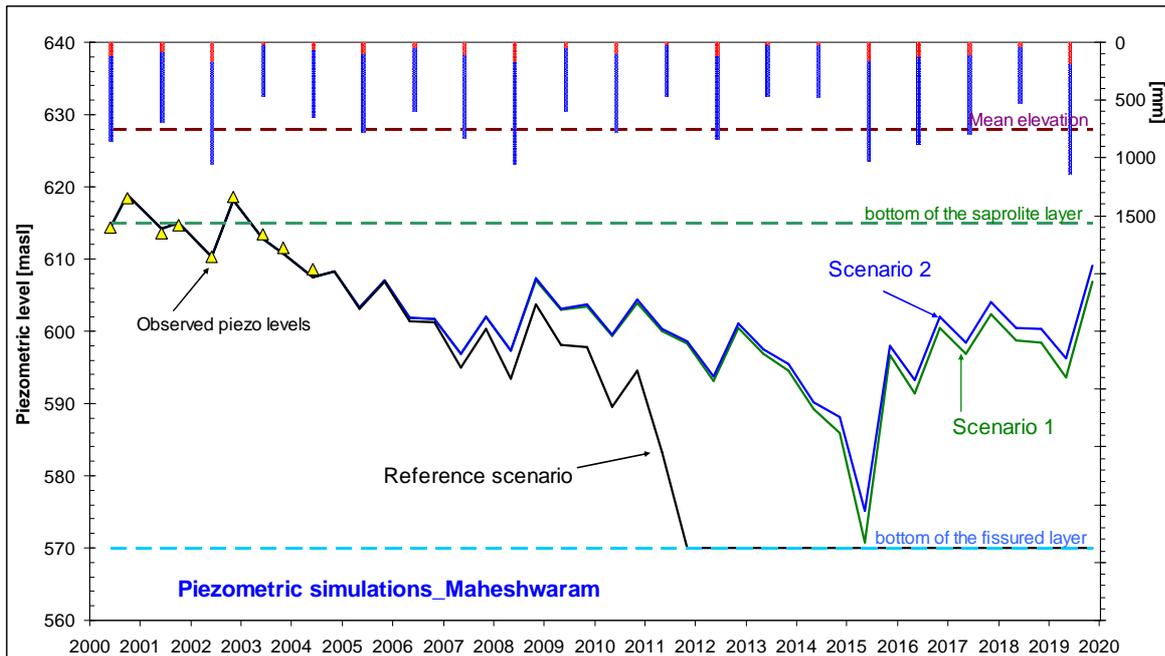
L'une des principales applications opérationnelles du modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle est la possibilité de gérer sa ressource en eau souterraine.

La connaissance, à l'échelle du bassin versant, de la géométrie (toit, mur) et des propriétés hydrodynamiques (porosité efficace notamment) des deux principaux horizons constitutifs de l'aquifère de socle permet de définir sa réserve en eau souterraine. Ce paramètre est important, notamment pour définir le temps de renouvellement de ses eaux souterraines et donc la durabilité des pollutions diffuses (voir par exemple Mougin *et al.*, 2015, dans le cadre de la présente conférence).

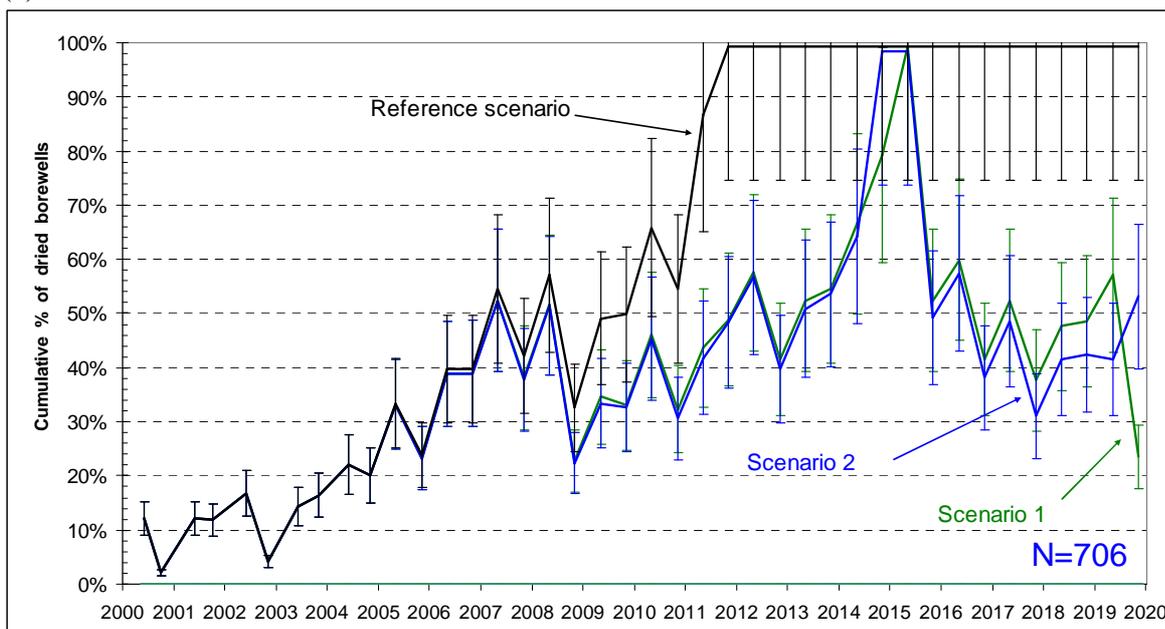
Ces connaissances permettent aussi et surtout d'évaluer non seulement le stock d'eau disponible, mais aussi sa recharge annuelle et donc de modéliser, de différentes manières (voir notamment Lachassagne *et al.*, 2014a, Dewandel *et al.*, 2010, mais aussi Durand *et al.*, 2015 dans le cadre de la présente conférence pour une modélisation de type déterministe), la ressource en eau souterraine et ses modalités d'exploitation, à la manière de ce qui est réalisé dans tout autre aquifère, de type sédimentaire par exemple. On montre ainsi que la représentation de l'horizon fissuré sous la forme d'un milieu poreux équivalent est tout à fait acceptable à l'échelle du bassin versant, au moins pour des applications de type « ressource en eau » (c'est moins le cas lorsqu'il s'agit d'aborder la problématique des transferts de solutés).

Dans le cas présenté en Figure 9, le niveau piézométrique moyen à l'échelle de l'aquifère est modélisé après avoir calibré les paramètres de l'aquifère (profil vertical de porosité efficace au sein de l'horizon fissuré notamment) sur la base de la baisse du niveau piézométrique en étiage (pompages uniquement, dans cet aquifère surexploité ne présentant plus de drainage naturel) et de sa remontée en saison des pluies (qui permet d'évaluer aussi la recharge). Des scénarios climatiques et d'exploitation permettent ensuite de simuler les variations futures du niveau piézométrique et, sur la base de la profondeur moyenne du mur de l'aquifère (horizon fissuré), de déterminer le nombre de puits asséchés. Avec un objectif

similaire, Durand *et al.* (2015) ont pour leur part mis en œuvre une modélisation déterministe aux différences finies.



(a)



(b)

Figure 9 - Exemple de simulations à long terme de la gestion de la ressource en eau à l'échelle du bassin versant (Maheshwaram, Inde) pour différents scénarios d'exploitation. (a) pluie annuelle (échelle du haut à droite) et niveau piézométrique moyen à l'échelle du bassin versant. (b) nombre de puits secs (Source : Dewandel *et al.*, 2010 ; Lachassagne *et al.*, 2014)

Références bibliographiques :

- Cho, M., Ha, K.M., Choi, Y.-S., Kee, W.S., Lachassagne, P., Wyns, R. (2003).- Relationships between the permeability of hard-rock aquifers and their weathered cover based on geological and hydrogeological observations in South-Korea.- In: IAH Conference on "Groundwater in fractured rocks", Prague (15-19 September)
- Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., Bougairé, F.D., Somé, S., Tapsoba, A. (2009).- Country-scale hydrogeological mapping of hard-rock aquifers and its application to Burkina Faso.- *Ground Water* 48, 269_283

- Courtois, N., Lachassagne, P., Weng, Ph., Theveniaut, H., Wyns, R., Joseph, B., Laporte, P. (2003).- Détermination de secteurs potentiellement favorables pour la recherche d'eau souterraine à Cacao (Guyane).- *Rapport BRGM/RM-52758-FR*
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal J.C., Krishnamurthy N.S. (2006).- A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering.- *Journal of Hydrology* 330, 260-284.
- Dewandel, B., Perrin, J., Ahmed, S., Aulong, S., Hrkal, Z., Lachassagne, P., Samad, M. and S. Massuel. (2010) - Development of a Decision Support Tool for managing groundwater resources in semi-arid hard rock regions under variable water demand and climatic conditions. *Hydrological Processes*, 24, 27884-2797.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Zaidi F.K. Chandra S. (2011).- A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India.- *Journal of Hydrology* 405 (2011) 474-487
- Durand, V., Léonardi, V., de Marsily, G., Lachassagne, P. (2015).- The two-layer conceptual model of hard-rock aquifers: validation with a deterministic hydrogeological model. Le modèle conceptuel bicouche des aquifères de socle : validation avec un modèle hydrogéologique déterministe. In *Proceedings of « Hard-Rock Aquifers: Up-to-date Concepts and Practical Applications (Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles).- 20th Technical Days of the International Association of Hydrogeologists French Chapter. June 11-13, 2015, ICES auditorium, La Roche-sur-Yon, Vendée, France »*
- Guihéneuf, N., Boisson, A., Bour, O., Dewandel, B., Perrin, J., Dausse, A., Viossanges, M., Chandra, S., Ahmed, S., Maréchal, J.C. (2014).- Groundwater flows in weathered crystalline rocks: Impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity, *Journal of Hydrology*, 511 (2014) 320–334
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.061>
- Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R. (2014a).- The conceptual model of weathered hard rock aquifers and its practical applications.- In *"Fractured Rock Hydrogeology", N°20 International Association of Hydrogeologists Selected Papers, Editor J. M. Sharp, Jr, CRC Press, Taylor and Francis Group, pp. 13-46*
- Lachassagne, P., Maréchal, J.C., Bienfait, P., Lacquement, F., Lamotte, Cl. (2014b).- Computing the water inflows discharge and assessing the impacts of tunnels drilled in Hard Rocks.- *IAEG XII Congress, Torino 2014. G. Lollino et al. (eds.), Engineering Geology for Society and Territory – Volume 3, DOI: 10.1007/978-3-319-09054-2_119, © Springer International Publishing Switzerland 2015, pp. 595-599*
- Lachassagne, P., Wyns, R., Dewandel, B. (2011).- The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes.- *Terra Nova* 23, 145-161
- Maréchal, J.C., Dewandel, B., Ahmed, Sh. (2015).- Utilisation d'essais hydrauliques à différentes échelles pour caractériser les propriétés des réseaux de fractures dans la couche fracturée altérée d'un aquifère de socle. In *Actes de la Conférences « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles ».- 20èmes Journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. 11-13 Juin 2015, Auditorium ICES, La Roche-sur-Yon, Vendée, France, 8 p.*
- Mougin, B., Thomas, E., Mathieu, F., Baltassat, J.M., Schroetter, J.M., Blanchin, R., Wyns, R., Bourguin, B., Putot, E., Lucassou, Fl. (2015).- Calcul des volumes d'eau souterraine sur 12 bassins versants bretons en zone de socle et apports sur les temps moyens de résidence des eaux souterraines - Computation of groundwater volumes of 12 Brittany hard rock catchments and contribution over the mean groundwater residence time. In *Proceedings of « Hard-Rock Aquifers: Up-to-date Concepts and Practical Applications (Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles).- 20th Technical Days of the International Association of Hydrogeologists French Chapter. June 11-13, 2015, ICES auditorium, La Roche-sur-Yon, Vendée, France »*
- Wyns, R., Baltassat, J.M., Lachassagne, P., Legchenko, A., Vairon, J., Mathieu, F. (2004).- Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France).- *Bulletin de la Société Géologique de France*, 175, (1), 21-34
- Wyns, R., Dewandel, B., Lachassagne, P. (2015).- Origine de la fracturation des aquifères de socle : quels sont les facteurs qui contrôlent les propriétés de l'horizon fissuré ? In *Actes de la Conférences « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles ».- 20èmes Journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. 11-13 Juin 2015, Auditorium ICES, La Roche-sur-Yon, Vendée, France, 8 p.*