



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Université de Montpellier
Faculté des Sciences
Section CNU 36
Ecole Doctorale GAIA, Mention Sciences de l'Univers

Aquifères de socle : schémas conceptuels, essais par pompage et régionalisation des propriétés hydrodynamiques

Mémoire des travaux de recherche en vue de l'obtention
de l'Habilitation à Diriger des Recherches

Benoît Dewandel

Chercheur, hydrogéologue

BRGM, Direction de l'Eau, de l'Environnement, des Procédés & Analyses
Unité Nouvelles Ressources en Eau et Economie



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Aquifères de socle : schémas conceptuels, essais par pompage et régionalisation des propriétés hydrodynamiques

Benoît Dewandel, chercheur, hydrogéologue
Habilitation à Diriger des Recherches

Soutenue le 27 juin 2019 à la Maison des Sciences de
l'Eau de Montpellier devant un jury composé de :

- Prof. S. Pistre, Univ. Montpellier, Président
- Prof. G. de Marsily, Univ. P.&M. Curie – Paris, Académie des Sciences, rapporteur
- Prof. M. Razack, Univ. de Poitiers, rapporteur
- J.-R. de Dreuzy, DR CNRS, Dir. OSUR, Géosciences Rennes, rapporteur
- N. Dörfliger, HDR, BRGM, examinatrice
- C. Leduc, DR IRD, Montpellier, examinateur
- Prof. H. Jourde, Univ. Montpellier, examinateur

BRGM, Direction de l'Eau, de l'Environnement, des Procédés & Analyses,
Unité Nouvelles Ressources en Eau et Economie

Sommaire

1. Résumé de carrière	11
1.1. CURRICULUM VITAE.....	11
1.2. FORMATION	11
1.3. EXPERIENCES PROFESSIONNELLES.....	11
1.3.1. Doctorant en hydrogéologie	11
1.3.2. Chercheur au BRGM	11
1.4. RESUME DU PARCOURS SCIENTIFIQUE.....	12
1.5. COORDINATION SCIENTIFIQUE	15
1.5.1. En interne BRGM.....	15
1.5.2. Coordination de contrats de recherche	15
1.5.3. Principales contributions à contrats de recherche sans responsabilité de coordination	16
1.6. ACTIVITE D'EXPERTISE	18
1.7. ENSEIGNEMENT, ENCADREMENT D'ETUDIANTS.....	18
1.7.1. Enseignement.....	18
1.7.2. Co-encadrement de doctorants.....	18
1.7.3. Participation à des jurys de thèse :	18
1.7.4. Co-encadrement de Master	19
1.8. PRINCIPALES COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES.....	19
1.9. AUTRES	19
1.10. LISTE DES PUBLICATIONS ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE.....	19
1.10.1. Evaluation bibliométrique	19
1.10.2. Liste des publications à comité de lecture	21
1.10.3. Chapitres de livres	24
1.10.4. Articles de vulgarisation scientifique.....	25
1.10.5. Brevet	25
1.10.6. Conférences et Proceedings	25
1.10.7. Liste des rapports.....	25
2. Synthèse des travaux.....	27
2.1. LES AQUIFERES DE SOCLE - MODELES CONCEPTUELS HYDROGEOLOGIQUES	
27	
2.1.1. Modèle conceptuel à l'échelle du bassin versant ou régional	27

2.1.2. Description des propriétés hydrodynamiques de l'horizon fracturé - exemple de l'aquifère granitique de Maheshwaram (Inde)	32
2.1.3. Généralisation des propriétés hydrodynamiques aux autres profils d'altération	35
2.1.4. Rôle d'une altération polyphasée sur les propriétés hydrodynamiques - exemple de l'aquifère granitique de Maheshwaram (Inde)	36
2.1.5. Rôle des hétérogénéités sur la géométrie et les propriétés hydrodynamiques des aquifères de socle : cas d'un filon de quartz décamétrique.....	38
2.2. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFERES PAR L'INTERPRETATION ET LA MODELISATION DES ESSAIS PAR POMPAGE.....	43
2.2.1. Généralités, rappel sur le diagnostic des essais	43
2.2.2. Les modèles que j'ai développés pour les milieux fracturés.....	45
2.2.3. Autres modèles	51
2.3. METHODES POUR SPATIALISER LES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DANS LES AQUIFERES DE SOCLE	54
2.3.1. La perméabilité	55
2.3.2. La porosité (efficace)	59
3. Perspectives de recherche.....	65
3.1. MODELES CONCEPTUELS	65
3.2. L'INTERPRETATION ET LA MODELISATION DES ESSAIS PAR POMPAGE.....	66
3.3. METHODES DE REGIONALISATION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES, VERS L'AMELIORATION DE LA GESTION DES AQUIFERES DE SOCLE....	67
4. Conclusion	71
5. Bibliographie.....	73

Liste des annexes

Annexe 1 Conférences et Proceedings	81
Annexe 2 Liste des rapports BRGM	89
Annexe 3 Tirés à part	97

Liste des figures

Figure 1 : résultat d'une recherche dans « Web of Science », le 11 octobre 2018.	20
Figure 2 : évolution du nombre de publications à comité de lecture en premier auteur et total. L'insert présente les revues de ces publications et leurs facteurs d'impact (IF d'après Thomson-Reuters, 2018).	20
Figure 3 : modèle conceptuel « ancien » des aquifères de socle, déconnecté (tiré de Lachassagne et Wyns, 2005).	28
Figure 4 : modèle conceptuel des aquifères de socle (tiré de Wyns et al., 1999, 2004).	28
Figure 5 : cavité souterraine plurimétrique creusée en base de cuirasse (granodiorite, Guyane française).	29
Figure 6 : a) horizon laminé (saprolite, granite). b) détail, les minéraux ont gardé leur orientation originelle.	30
Figure 7 : exemples d'horizons fracturés. a) granodiorite, Guyane; b) granite, Lozère (© R. Wyns).	31
Figure 8 : localisation du bassin versant de Mahesharam, granite, Inde.	32
Figure 9 : distribution des perméabilités au sein de l'horizon fracturé à partir d'essais slug-tests sur 47 ouvrages ; granite Inde (tiré de [21*, 41]).	33
Figure 10 : perméabilités des zones productives déduites des essais au micro-moulinet (N=84; tiré de [37*, 41]).	33
Figure 11 : modèle conceptuel des propriétés hydrodynamiques de la zone fracturée des aquifères de socle en contexte granitique (tiré de [41]).	34
Figure 12 : pompage dans l'horizon fracturé stratiforme d'un granite (Inde ; tiré de [41]). Mise en évidence du comportement double porosité de l'aquifère. Modèle : double porosité (Warren & Root [W&R]). Der. : dérivée (observation et modèle).	35
Figure 13 : valeurs de perméabilité de la saprolite et de la zone fracturée (granites et gneiss) ; tiré de [37*]. Données bibliographiques issues de tests hydrauliques, saprolite : 134 tests, zone fracturée : 234 tests. « this study » : cas de l'aquifère granitique de Maheshwaram (Inde).	36
Figure 14 : évolution probable du profil d'altération depuis le Jurassique-Crétacé à l'actuel en Inde du Sud (granite, tiré de [37*]).	37
Figure 15 : modèle conceptuel géologique et hydrogéologique des aquifères granitiques contrôlé par une ou plusieurs phases d'altération (tiré de [37*]).	38
Figure 16 : modèle hydrodynamique conceptuel d'un aquifère de socle en présence d'une discontinuité géologique : exemple d'un filon de quartz au sein d'un granite, Inde (tiré de [23]).	40
Figure 17 : diagramme de densité représentant la distribution des pôles des fractures sur la veine de quartz (Inde ; tiré de [23]). Projection dans l'hémisphère inférieur.	40
Figure 18 : pompage dans la zone fracturée horizontale stratiforme du granite (Inde) ; forage situé à environ 60 mètres du filon de quartz. Mise en évidence du comportement double porosité de la formation. Modèle : Double porosité (Warren & Root [W&R]). Der. : dérivée (observation et modèle).	41
Figure 19 : pompage dans l'horizon vertical du granite à proximité d'un filon de quartz décimétrique (Inde). Mise en évidence de la structure bidimensionnelle de l'aquifère due à la forme en « U » du profil d'altération (tiré de [23]). Der. : dérivée (observations et modèles).	41

Figure 20 : pompage dans un filon décamétrique de quartz (Inde ; tiré de [23]). Mise en évidence du comportement double porosité de la formation. Modèle : double porosité (WTFM de Lods et Gouze, 2004).	42
Figure 21: exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos ; modèle développé par l'auteur.	44
Figure 22 : aquifère compartimenté en « T » avec anisotropie de perméabilité dans le compartiment central (tiré de [13*]).	46
Figure 23 : application du modèle en « T » au pompage de longue durée (9 semaines) dans la zone de failles du site de St Brice en Coglès (35), schistes (tiré de [13*]).	46
Figure 24 : aquifère compartimenté en « T » avec anisotropie 3-D de perméabilité dans le compartiment central et captage partiel de l'ouvrage ; modèle non publié.	47
Figure 25 : une seule fracture verticale incisant partiellement un aquifère multicouche (tiré de [1*]).	49
Figure 26 : deux fractures inclinées dans un aquifère soumis à effet de drainance : paramètres du modèle (tiré de [1*]).	49
Figure 27 : deux fractures inclinées dans un aquifère soumis à effet de drainance, pompage dans les fractures et dans l'intervalle crépiné du puits (ici sur toute la hauteur de l'aquifère) ; voir la figure précédente pour les paramètres du modèle (tiré de [1*]).	50
Figure 28 : exemples de modèles développés. Aquifères multi-couches : a) le puits capte les deux niveaux aquifères, b) aquifère rectangulaire, captage partiel de l'ouvrage, anisotropie de perméabilité 3D, c) aquifère rectangulaire avec drainance et forage incliné, d) aquifère rectangulaire avec drainance et cours d'eau, e) le puits capte une fracture verticale, drainance et cours d'eau.	52
Figure 29 : modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc (Crétacé karstifié ; Rousset, Bouche-du-Rhône). Modèle : Figure 28b. Réalisé dans le cadre du projet ARK.	53
Figure 30 : modélisation de l'essai du 08/12/07 au 06/02/2008 au forage FE7 (schistes du Briovérien-Bretagne). Modèle : Figure 28e. Réalisé dans le cadre du projet AFF (Bretagne).	53
Figure 31 : établissement d'une relation empirique entre les distributions de débit linéaire (Q/H) et la perméabilité de l'horizon fracturé d'un granite déduit d'essai slug tests ($K_{slugtest}$) ; Maheshwaram, Inde (tiré de [21*]).	56
Figure 32 : à gauche : cartographie de la perméabilité à partir des données de Q/H et, à droite : comparaison entre les valeurs calculées (LogKm) et mesurées (LogKs), Maheshwaram, Inde (tiré de [21*]).	57
Figure 33 : à gauche : carte piézométrique, à droite : établissement d'une relation empirique entre les distributions de la pente de la piézométrie résiduelle et la perméabilité déduite d'essais slug tests, horizon fracturé d'un aquifère de péridotite ; Nouvelle Calédonie (tiré de [2*]).	58
Figure 34 : à gauche : cartographie de la perméabilité à partir des données de la pente de la piézométrie résiduelle ; à droite : comparaison entre les valeurs calculées (LogTmeas.) et mesurées (LogTcomp), Nouvelle Calédonie (tiré de [2*]). Fractures tracées à partir d'observations géologiques et géophysiques (Robineau et al., 2007).	59
Figure 35 : évolution de la valeur moyenne calculée de la porosité efficace (S_y) en fonction de la taille des cellules. Sont aussi représentés : valeurs min et max, écart type et le pourcentage de cellules où il y a des pompages. Application au bassin versant de Maheshwaram Inde (tiré de [21*]).	60

Figure 36: évaluation du champ de porosité efficace (S_y) de la zone de fluctuation piézométrique ; valeur moyenne : 1,5%. Taille des cellules de calcul : 650x650 m. Application au bassin versant de Maheshwaram, Inde (tiré de [21*]).	60
Figure 37 : schéma de calcul de la porosité efficace (S_y) pour chaque intervalle de profondeur, par rapport à l'interface entre les saprolites et la zone fracturée (tiré de [3]).	62
Figure 38 : estimation des champs de porosité efficace (S_y) par intervalle de profondeur au sein du profil d'altération (saprolite et ZF : zone fracturée). Bassin versant de Kudaliar, 983 km ² , Inde (tiré de [3]).	62
Figure 39 : coupe du champ de porosité efficace (S_y). Coupe NS, bassin versant de Kudaliar, Inde (tiré de [3]).	63
Figure 40 : variations verticales moyennes de S_y dans le profil d'altération des deux bassins versants de Kudaliar et Anantapur ; les barres représentent les écarts-types (tiré de [3]).	63
Figure 41 : variation verticale moyenne de la porosité efficace (S_y) dans le profil d'altération du bassin versant de Maheshwaram ; les barres représentent les écarts-types. Calcul issu d'une modélisation 3-D de S_y (tiré de la thèse A.Nizam, publication en cours).	69
Figure 42 : comparaison entre piézométrie mesurée et calculée sur 10 cartes piézométriques saisonnières entre 2011 et 2016 ; bassin versant de Maheshwaram. Modèle DST_spatial (tiré de la thèse A.Nizam, publication en cours).	69
Figure 43 : calcul de la recharge ; résolution 650x650m ; bassin versant de Maheshwaram. Modèle DST_spatial (tiré de la thèse A.Nizam, publication en cours).	70

1. Résumé de carrière

1.1. CURRICULUM VITAE

Benoît Dewandel

Chercheur en hydrogéologie

Né le 09/09/1973

BRGM, unité NRE/D3E

Marié, 2 enfants

1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier

1.2. FORMATION

1996 Diplôme d'Etudes Approfondies « Structure et Evolution de la Lithosphère – Modèles physiques et applications », Université de Montpellier II, France. Mémoire : interprétation des diagraphies en domaine océanique – Exemple des gabbros du forage ODP Leg118 site 735B.

1997 Diplôme Universitaire « Environnement et Santé Publique », Faculté de Pharmacie de Montpellier, France. Mémoire : analyses chimiques du phosphore et de l'azote dans les sédiments lagunaires, problèmes d'eutrophisation des étangs côtiers.

1997-1998 Service militaire Environnement. Dépt. Sc. de l'Env. et Santé Publique de la Faculté de Pharmacie de Montpellier (UMI). Eutrophisation des étangs côtiers du Languedoc (France) : précipitation et adsorption des phosphates.

1998-2002 Doctorat en hydrogéologie, Université Montpellier II - BRGM, France. Structure et fonctionnement hydrogéologique d'un aquifère discontinu: l'ophiolite d'Oman.

1.3. EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

1.3.1. Doctorant en hydrogéologie

1998-2002 : étudiant en thèse. Université Montpellier II - BRGM, Lab. de Tectonophysique.

Etude pluridisciplinaire ayant pour objectif de comprendre le fonctionnement hydrogéologique des aquifères de l'ophiolite d'Oman.

1.3.2. Chercheur au BRGM

Le BRGM est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). Il est placé sous la tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, du ministère de la Transition écologique et solidaire, et du ministère de l'Économie

En Inde :

2002-2006. Hydrogéologue et chercheur au Centre Franco-Indien de Recherche sur les Eaux Souterraines (CEFIREs, collaboration BRGM-NGRI), Hyderabad, Inde.

2007. Hydrogéologue et chercheur au BRGM au CEFIRES. Responsable d'un projet ASIA-ProEco et faisant fonction de co-chef d'équipe du CEFIRES (3 chercheurs et 8 étudiants).

Principales thématiques abordées : géologie et hydrogéologie des aquifères de socle (granites, roches métamorphiques), modèles conceptuels, essais par pompage (méthode de diagnostic), développement de modèle de gestion de la ressource en eau souterraine.

En France :

Depuis 2007. Hydrogéologue et chercheur au BRGM à Montpellier dans l'unité Nouvelles Ressources en Eau et Economie au sein de la Direction Eau, Environnement et Ecotechnologie dirigée aujourd'hui par Nathalie Dörfliger. L'unité NRE est aujourd'hui sous la direction de Jean-Christophe Maréchal.

Activités : travaux de recherche, responsable de projets R&D régionaux publics et privés, expertises, et référent thématique sur les aquifères de socle et les essais par pompage.

Principales thématiques abordées : géologie et hydrogéologie des aquifères de socle et des systèmes hydrothermaux, modèles conceptuels, essais par pompage (théorie), méthode de spatialisation des propriétés hydrodynamiques, modélisation hydro-géochimique, études pluridisciplinaires, développement de modèle de gestion de la ressource en eau souterraine.

1.4. RESUME DU PARCOURS SCIENTIFIQUE

Les références entre [xx] renvoient à la liste de mes publications (§ 1.10). Celles présentant une astérisque () sont disponibles en annexe (référence n°1, 2, 13, 21, 37).*

Cette partie présente les principales étapes de mon parcours de chercheur.

De 1999 à 2002, durant ma thèse codirigée par le Professeur Françoise Boudier (UMII) et Patrick Lachassagne (BRGM)¹, j'ai contribué à apporter de la connaissance sur la structure et le fonctionnement hydrogéologique d'un aquifère discontinu, celui de l'ophiolite d'Oman. L'évaluation des propriétés aquifères des diverses unités géologiques des roches de socle de cette ophiolite (péridotites, gabbros et dolérites) était une nécessité afin d'apporter un appui scientifique et technique au ministère des ressources en eau du Sultanat d'Oman pour la mise en œuvre d'une gestion durable de la ressource en eau de ce complexe. Pour atteindre ces objectifs, une approche pluridisciplinaire intégrant hydrologie, hydrogéologie, géochimie, pétrophysique et géologie, et multi-échelles, du bassin versant à l'échantillon, fût mise en œuvre. L'analyse de l'ensemble des résultats a permis de proposer un modèle conceptuel de la structure (géométrie, propriétés hydrodynamiques...) et du fonctionnement (pluie efficace, recharge...) des différents compartiments de cet aquifère complexe [39]. D'un point de vue pratique, ce travail a permis d'évaluer les potentialités des aquifères et donner des conseils pratiques sur la gestion de cette ressource en eau et l'implantation de forages pour l'alimentation en eau potable. Ce travail a aussi permis l'élaboration de méthodologies pour estimer les propriétés aquifères à l'échelle de sous bassins versants à partir de mesures ponctuelles ou de séries chronologiques des débits des cours d'eau [40, 42].

Outre le fait d'avoir travaillé et collaboré avec plusieurs personnes issues de thématiques différentes des Sciences de la Terre (hydrogéologues, géologues, pétrophysiciens) de l'université de Montpellier et du BRGM, cette première expérience de recherche en hydrogéologie fût

¹ Aujourd'hui à Danone Eaux.

importante pour la suite, car elle a su notamment allier géologie et hydrogéologie, deux disciplines fondamentales lorsque l'on veut s'intéresser à la dynamique des écoulements, notamment dans les aquifères fracturés. C'est aussi durant ces années que j'ai été initié aux techniques d'interprétation des essais par pompage, d'abord les classiques, sous l'égide de P. Lachassagne, puis les plus modernes, issues du milieu pétrolier, avec G. Lodz et H. Jourde alors étudiants au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'UMII sous la direction du Professeur C. Droque.

En 2002, j'ai été recruté par le BRGM pour partir en Inde, en famille, durant 5 ans. C'est ainsi que j'ai intégré le CEFIRES (Centre Franco-Indien de Recherche sur les Eaux Souterraines créé en 1999) composé à l'époque d'une équipe de 2 chercheurs du BRGM et d'un étudiant en thèse (Devaraj de Condappa), de 3 chercheurs du NGRI et d'étudiants indiens en thèse. La partie française était alors sous la direction de Patrick Lachassagne, chef de l'unité NRE à Montpellier (ex-unité RMD). C'est dans ce centre et au contact de mes collègues hydrogéologues et géophysiciens que j'ai pu renforcer mes compétences dans le domaine de l'hydrogéologie des aquifères de socle (granites, roches métamorphiques).

Un des premiers objectifs sur lequel nous étions attendus était la conceptualisation des aquifères en milieu granitique, jusqu'alors considérés comme trop complexes pour pouvoir être modélisés et encore plus pour être gérés de façon pertinente et pratique. Ainsi, j'ai participé à nombre d'études géologiques –notamment cartographie du profil d'altération, levé des logs de forages, et participé à la réalisation d'études hydrogéologiques : cartes piézométriques détaillées, essais par pompage, essais slug-tests, en injection, en débit-métrie, etc. Ces études étaient menées en grande partie sur le bassin versant d'une cinquantaine de km² de Maheshwaram que suivait –et suit toujours- le CEFIRES. Elles ont permis de nettement améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de ces formations. Notamment, elles ont démontré la pertinence d'un point hydrogéologique du modèle conceptuel géologique des aquifères de socle soumis à l'altération supergène proposé par Robert Wyns (géologue au BRGM ; Wyns et al., 1999, 2004), [31, 36, 37*, 41, 43]. Ce modèle a été réadapté aux conditions d'altérations polyphasées qu'a subi la plaque indienne depuis la fin du Jurassique [37*], puis au niveau de discontinuités géologiques [23, 29]. Ce modèle met en avant une certaine continuité des propriétés hydrodynamiques spatiales de ces aquifères, ce qui a permis l'élaboration de techniques de bilan pour ces aquifères [32, 35, 38]. C'est à partir de ces techniques que j'ai développées, dans le cadre d'un projet Asia ProEco (projet SUSTWATER), un outil d'aide à la décision pour améliorer la gestion de la ressource en eau souterraine [30, 34, 46]. Les aquifères de socle étaient donc devenus des aquifères moins complexes, où, entre autres, il était possible de mettre en place une gestion de la ressource. Durant ces années, j'ai aussi amélioré mes compétences en terme d'interprétation et de modélisation des essais par pompage, notamment en appliquant les techniques de diagnostic basées sur la dérivée des rabattements (Bourdet et al, 1983), mais aussi en développant des algorithmes de déconvolution des débits, de lissage, afin d'avoir les diagnostics les plus pertinents possibles. Sur ces bases, j'ai pu aider et initier des étudiants indiens et français, en thèse et Master 2, à l'hydrogéologie des aquifères de socle et aux techniques d'interprétation des essais par pompage. Ceci s'est concrétisé par un certain nombre de publications scientifiques communes [31, 33, 35, 36, 51]. Durant, cette période j'ai aussi été en contact avec la Cellule Franco-Indienne de Recherche en Sciences de l'Eau (CEFIRSE) de Bangalore, unité mixte IRD IISc (Indian Institute of Science, Bangalore), où nous avons pu échanger sur nos visions conceptuelles des aquifères de socle [27, article écrit quelques années plus tard].

En 2007, j'ai intégré l'équipe NRE de Montpellier, sous la direction de P. Lachassagne. Ce fût la découverte de la comptabilité analytique pour la gestion du temps de travail, de la gestion de projets, et de la recherche sous contrat, puisque nos ministères de tutelle ne couvrent que 50% de nos dépenses. En Inde, le CEFIRES fonctionnait sur fonds propres BRGM, ce qui facilitait grandement les projets de recherche scientifique. Néanmoins, cette nouvelle façon de travailler

m'a permis de monter et mener plusieurs projets de recherche public (CASPAR, ALOZ, HYPERK) ou avec des industriels (SALVETAT1 & 3 ; BADOIT), de participer à des programmes ANR (MOHINI, SHIVA, Stock En Socle), de nombreux projets de recherche (ARK, Dem'Eaux Thau, Dem'Eaux Roussillon), de services publics ou d'expertises sur un panel de formations géologiques (voir liste des rapports, [9, 18, 26]). Ces projets, cofinancés tant par des Régions, Départements, Agences de l'Eau, l'Europe, l'ANR, le CNRT, etc., que par des industriels (Danone, Nestlé, Total), m'ont permis de continuer à travailler sur mon domaine de prédilection, les aquifères de socle. Ces travaux ont permis d'améliorer leur conceptualisation [6, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 22, 24, 25, 27], notamment aux niveaux de failles, en axant sur une compréhension pluridisciplinaire du système (géologie, hydrogéologie, hydraulique, géochimie, modélisation). C'est au travers de collaborations comme avec Géosciences Rennes et le co-encadrement d'un étudiant en thèse (CASPAR, Thèse C. Roques ; [7, 13*, 16, 17]), ou de programmes menés avec des industriels en s'intéressant notamment aux gisements d'eaux minérales carbo-gazeuses en milieux gneissiques ou en marches de socle sur des grabens en bordure de Limagnes (SALVETAT1 & 3 ; BADOIT ; [4, 20]) que les améliorations des modèles conceptuels de ces aquifères furent les plus pertinentes.

Ces projets m'ont aussi permis de poursuivre le partenariat avec l'Inde (projets ANR SHIVA, MOHINI), afin de notamment développer des techniques de spatialisation des propriétés hydrodynamiques des aquifères de socle [2*, 3, 21*]. Ma collaboration avec le CEFIRES se poursuit toujours puisque en 2016, j'ai accueilli un jeune chercheur indien en thèse pendant 6 mois dans le cadre d'une bourse CEFIPRA (Centre Franco-Indien pour la Promotion de la Recherche Avancée) avec qui nous avons fait évoluer l'outil de gestion que j'avais développé en Inde à l'échelle du bassin versant [30, 34], en le spatialisant. De même les collaborations avec Géosciences Rennes n'ont jamais cessé, notamment avec le Prof. Olivier Bour, puisque j'interviens régulièrement auprès d'étudiants en thèse en Inde (thèses BRGM-Univ. de Rennes : N. Guihéneuf, M. Nicolas ; [14]). Il y a aussi eu une sorte de retour aux sources avec le projet HYPERK sur les aquifères en contexte ophiolitique notamment en co-encadrant un travail de thèse (J. Jeanpert) avec l'Université de la Réunion (Prof. J.L. Join) pour améliorer la compréhension hydrogéologique des massifs de péridotites de Nouvelle Calédonie. Dans ce cadre, nous avons aussi proposé une nouvelle technique de spatialisation des propriétés hydrodynamiques [2*].

Depuis 2017, j'anime le projet MORPHEUS (MéthOdologie de Régionalisation des Propriétés HydrogEologiques des aqUifères de Socle), cofinancé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et le BRGM sur une durée de trois ans. Ce projet est motivé par mes travaux précédents mais aussi par la difficulté que nous avons à réaliser des modélisations numériques robustes et des prédictions fiables dans ce type de milieu, en particulier en termes de transport. Il a pour objectif de mettre en œuvre diverses méthodes de régionalisation des paramètres hydrodynamiques et de les tester avec l'appui de modèles numériques. Le projet est en cours.

Mon activité en France me permet ainsi de poursuivre la réflexion sur la conceptualisation des aquifères de socle et la spatialisation de leurs propriétés, mais aussi de m'intéresser à de nombreuses autres situations hydrogéologiques : aquifères karstiques, volcaniques, sédimentaires, fluvio-glaciaires, etc. Par ailleurs, j'ai continué à développer mes compétences en modélisation des essais par pompage, en proposant de nouvelles solutions mathématiques dédiées aux milieux fracturés [1*, 13*], ou encore d'autres modèles en m'intéressant par exemple aux relations entre l'aquifère pompé et les cours d'eau (Projet avec l'ONEMA ; rapport BRGM/RP-67566-FR). Cette passion des essais par pompage – et des développements assujettis- a permis d'apporter une contribution significative sur la compréhension du fonctionnement hydrogéologique d'aquifères de tous genres, y compris ceux de socle. Aujourd'hui, une grande partie de mon activité concerne cette thématique, et depuis mon retour en France j'anime la formation « interprétation et valorisation des données de pompage » au BRGM (formation niveau

ingénieur ouverte à l'extérieur) et je forme par compagnonnage des collègues aux techniques d'interprétation/modélisation avancées. Ainsi, les différentes collaborations avec mes collègues du BRGM me permettent de travailler régulièrement sur d'autres types d'aquifères : karstiques (projet ARK), carbonates fracturés (Projet Nainglet), sédimentaires (Dem'EauxRoussillon), thermo-minéraux (Dem'EauxThau, Quézac) ou volcaniques (ALoz, RIVAGE). Même si tous ces projets ne donnent pas forcément lieu à des publications scientifiques ou à des interventions dans des colloques, ils me permettent d'accroître mon expérience d'hydrogéologue, d'améliorer la connaissance de ces aquifères et aussi de faire du développement méthodologique pour l'interprétation et la modélisation des essais par pompage (voir la liste des rapports et des conférences).

Mes collaborations avec mon environnement académique de proximité sont multiples. Avec l'UMR HydroSciences de Montpellier (HSM) en participant régulièrement à des comités de thèse sous les directions du Prof. H. Jourde et de V. Léonardi, à examiner des travaux de thèse (jury de thèse de M. Noirot en 2011), ou encore donner des cours sur l'hydrogéologie des aquifères de socle. Depuis quelques années, mon unité et l'UMR G-Eau se sont rapprochées. Cherchant à élargir mes collaborations scientifiques avec d'autres disciplines travaillant sur les questions de gestion intégrée et adaptative de l'eau, en 2018 je suis devenu chercheur associé de cette UMR. Ceci m'a permis, entre autres, de participer aux comités de pilotage de la thèse d'A. Sebal) dirigée par C. Leduc (DR-IRD) et S. Massuel (IRD). Par ailleurs, je donne depuis 2007 des cours en hydrogéologie générale et hydrogéologie des aquifères de socle à AgroParisTech Montpellier (responsable de la formation : G. Cadic).

1.5. COORDINATION SCIENTIFIQUE

1.5.1. En interne BRGM

Depuis 2009, je suis référent thématique dans les domaines de l'hydrogéologie des aquifères de socle et des essais par pompage. Cette position m'a permis de monter un certain nombre de projets, et d'apporter, de plus en plus, mon appui aux autres chefs de projets pour le montage de projets R&D (par ex. Puits de l'ARK, Evian) ou de type Service Public (par ex. forage de Nainglet, Sources d'Entraigues) et à défendre les dossiers techniques auprès de potentiels financeurs.

1.5.2. Coordination de contrats de recherche

a) Contrats de recherche régionaux – DOM/TOM

- **2017-2019** MORPHEUS, MéthOdologie de Régionalisation des Propriétés HydrogEologiques des aqUifères de Socle. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne. Partenariat scientifique : BRGM. Budget géré par le BRGM : 200 000 €.
- **2013-2017** HYPERK, Hydrogéologie des massifs miniers (péridotites), Nouvelle Calédonie. Projet cofinancé par le CNRT (Centre National de Recherche Technologique, Nouvelle Calédonie) et piloté par l'Univ. de la Réunion. Partenariat scientifique : BRGM, Univ. Réunion, Service Géologique de Nouvelle Calédonie, IRD, HSM, UPMC, Golder Associés et GNS. Budget géré par le BRGM : 250 000 €.
- **2010-2017** ALOZ – Aubrac LOZère. Fonctionnement hydrogéologique des formations volcaniques anciennes de l'Aubrac. Caractérisation hydrogéologique des aquifères volcaniques du secteur de la source de Font Rouge (Lozère). Projet piloté par le BRGM et cofinancé par la région Languedoc-Roussillon, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, DREAL Languedoc-Roussillon, Union Européenne. Partenariat scientifique : BRGM, Observatoire de

Physique du Globe de Clermont-Ferrand (CNRS- UMR 6524). Budget géré par le BRGM : 739 000 €.

- **2010-2013** CASPAR, Caractérisation des Aquifères Semi-Profonds Armoricaux. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par la région Bretagne, Cons. Dépt d'Ille-et-Vilaine, Rennes Métropole, l'Etat et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne. Partenariat scientifique : BRGM, OSUR Rennes. Budget géré par le BRGM : 534 000 €.

b) Contrat de recherche européen

- **2006-2009** SUSTWATER, Towards SUSTainability of WATER management: implementation of a groundwater decision support tool (Inde du Sud). Projet piloté par le BRGM et cofinancé par l'Union Européenne (projet Asia ProEco). Chef de projet uniquement en 2006-2007. Partenariat scientifique : BRGM, International Water Management Institute (IWMI, Inde), National Geophysical Research Institute (NGRI, Inde), Charles University, Prague (Rép. Tchèque). Budget géré par le BRGM : 215 000 €.

c) Contrats de recherche avec des industriels

- **2015-2018** SALVETAT 3, Système minéral carbo-gazeux de la SALVETAT (Hérault) : Modélisation déterministe distribuée du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique – Perspectives pour la gestion et la protection de la ressource en eau minérale naturelle. Projet piloté par le BRGM et financé par Danone. Partenariat scientifique : BRGM, Danone. Budget géré par le BRGM : >100 000 €.
- **2012-2014** BADOIT, Système minéral carbo-gazeux de BADOIT (Saint-Galmier - Loire) : amélioration de la connaissance du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique – Perspectives pour la gestion et la protection de la ressource en eau minérale. Projet piloté par le BRGM et financé par Danone. Partenariat scientifique : BRGM, Danone. Budget géré par le BRGM : >100 000 €.
- **2009-2010** SALVETAT 1, Système minéral carbo-gazeux de la SALVETAT (Hérault) : conceptualisation du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique – Perspectives pour la gestion et la protection de la ressource en eau minérale. Projet piloté par le BRGM et financé par Danone. Partenariat scientifique : BRGM, Danone. Budget géré par le BRGM : >100 000 €.

1.5.3. Principales contributions à contrats de recherche sans responsabilité de coordination

- **2017-2021** DEM'EAUX THAU, élaboration d'un outil de gestion des ressources souterraines d'un hydrosystème karstique complexe en contexte méditerranéen. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par la région Occitanie, l'AERMC, l'Europe, le Syn. Mixte du Bassin de Thau, Balaruc-les-Bains. Partenariat scientifique : BRGM, Géosciences Montpellier, HSM, Synapse. Principale contribution : hydrogéologie d'un système karstique, hydrodynamique (modélisation d'essais par multi-puits de longue durée).
- **2017-2020** DEM'EAUX ROUSSILLON, caractérisation transdisciplinaire d'un aquifère côtier complexe, pour une exploitation maîtrisée et durable de sa ressource en eau en contexte méditerranéen. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par la région Occitanie, l'AERMC, l'Europe, Cons. Dépt. des Pyrénées Orientales. Partenariat scientifique : BRGM, Géosciences Montpellier, HSM, Synapse, BRL, GeoTer, IRSTEA. Principale contribution : hydrogéologie de l'aquifère plio-quadernaire, hydrodynamique (modélisation d'essais par pompage, régionalisation de paramètres hydrodynamiques).
- **2016-2018** PNMH, Pôle National de Modélisation en Hydrogéologie. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par l'ONEMA (AFB). Volet : Méthodes analytiques d'estimation de l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe sur un cours d'eau –Problématique et solutions mathématiques.

- **2016-2018** RIVAGE, InnoVer en Agroécologie pour Gérer, préserver et restaurer la qualité Environnementale du territoire. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par l'Europe et la région Guadeloupe. Partenariat scientifique : BRGM, CIRAD, INRA, Univ. Antilles-Guyane. Principale contribution : hydrogéologie d'un système volcanique, hydrodynamique (modélisation d'essais par pompage de longue durée couplage avec le suivi géochimique).
- **2013-2017** ARK, Amélioration de la connaissance hydrogéologique des Aquifères karstiques sous Couverture du bassin d'Aix-Gardanne. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Partenariat scientifique : BRGM, Société du Canal de Provence. Principale contribution : hydrogéologie d'un système karstique, hydrodynamique (modélisation d'essais par pompage de très longue durée sur des puits de mine).
- **2013-2017** Stock-en-Socle (ANR13-SEED-0009 2013), exploitation géothermique en milieu de socle peu perméable. Principale contribution : hydrodynamique dans les aquifères de socle.
- **2013-2015** ENTRAIGUES, amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la source d'Entraigues. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par le SIAE de la source d'Entraigues, la commune de Vidauban, l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse et le Conseil Général du Var. Principale contribution : hydrogéologie d'un système karstique, hydrodynamique (modélisation d'essais par pompage multi-puits de longue durée).
- **2013-2014** CHLOR-EAU-SOL, Caractérisation de la contamination par la chlordécone des eaux et des sols des bassins versants pilotes guadeloupéens et martiniquais. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par l'ONEMA, Office De l'Eau 971 et l'ODE972. Partenariat scientifique : BRGM, CIRAD. Principale contribution : hydrogéologie d'un système volcanique, hydrodynamique (modélisation d'essais par pompage de très longue durée).
- **2011-2012** HydroGOL, Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol. Projet piloté par le BRGM et cofinancé par l'Office De l'Eau Réunion. Partenariat scientifique : BRGM. Principale contribution : hydrogéologie d'un système volcanique, hydrodynamique (modélisation d'essais par pompage de très longue durée).
- **2009-2011** SHIVA (SHIVA-ANR-08-VULN-010), Evaluation socio-économique de la vulnérabilité rurale des usagers de l'eau sous l'effet des changements globaux dans la zone de socle du sud de l'Inde. Partenaires du projet : CEFIRSE / NGRI à Hyderabad ; CEFIRES / IISc à Bangalore, IFP à Pondichéry, CSH à New Delhi, NGRI, CESS à Hyderabad. Projet piloté par le BRGM. Principale contribution : hydrogéologie dans les aquifères de socle en Inde et développement de méthodes de spatialisation des propriétés hydrodynamiques.
- **2008-2010** MOHINI (ANR-07-VULN-O08), vulnérabilité sur la quantité et la qualité des eaux souterraines des aquifères de socle en Inde du Sud et en Bretagne vis-à-vis des changements globaux. Partenaires : BRGM, Géosciences Rennes, Géosciences Montpellier, Itasca, Centre de géochimie de la Surface (Strasbourg), National Geophysical Research Institute (NGRI). Projet piloté par le BRGM. Principale contribution : hydrodynamique dans les aquifères de socle en Inde et développement de méthodes de spatialisation des propriétés hydrodynamiques.
- **2009-2010** EVIAN, Système minéral d'EVIAN (Savoie) : Conceptualisation du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique – Perspectives pour la gestion et la protection de la ressource en eau minérale. Projet piloté par le BRGM et financé par Danone. Partenariat scientifique : BRGM, Danone. Principale contribution : hydrogéologie d'un système fluvio-glaciaire, hydrodynamique (modélisation d'essais par pompage).

1.6. ACTIVITE D'EXPERTISE

De par mon expérience, notamment en ce qui concerne l'interprétation et la modélisation des essais par pompage, j'effectue régulièrement des appuis techniques pour la Police de l'Eau (DREAL, DDT) et parfois pour des assurances (SAF Environnement). Voir la liste des rapports expertises et avis techniques en annexe.

1.7. ENSEIGNEMENT, ENCADREMENT D'ETUDIANTS

1.7.1. Enseignement

- **Depuis 2007.** Formation pompage au BRGM, Orléans. Valorisation et interprétation des données issues des tests par pompage. Niveau ingénieur, 2,5 jours, 1 à 2 fois par an.
- **Depuis 2007.** Cours d'hydrogéologie sur les aquifères de socle et d'hydrogéologie (8h, tous les ans), Mastère spécialisé gestion de l'eau, AgroParisTech Montpellier.
- **Depuis 2008.** Cours d'hydrogéologie sur les aquifères de socle à l'UMII (4h, tous les ans). MASTER EAU.

1.7.2. Co-encadrement de doctorants

- **2017-2018.** Participation aux comités de thèse de la thèse de Victor Clauzon, encadrement : V. Léonardi (UMII), G. Massonat (Total). Titre : Caractérisations in situ (à différentes échelles) des transferts de fluide dans une zone de faille majeure.
- **2017-2018.** Participation aux comités de thèse de la thèse d'Amal Sebai, encadrement : J. Tarhouni (LSTE-INAT, Tunis), C. Leduc (UMR G-EAU). Titre : Etude socio-économique de la sebkha Kelbia en Tunisie centrale : évolution de la ressource en eau et trajectoires d'adaptations aux changements globaux.
- **2013-2017.** J. Jeanpert. Encadrement : J.L. Join (Univ. Réunion), B. Dewandel. « Structure et fonctionnement hydrogéologiques des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. » Université de La Réunion. Actuellement hydrogéologue au Service Géologique de Nouvelle Calédonie.
- **2010-2013.** C. Roques. Encadrement : O. Bour, L. Aquilina (Univ. Rennes), B. Dewandel. « Hydrogéologie des zones de faille du socle cristallin : implications en terme de ressources en eau pour le Massif Armoricaïn. » Géosciences Rennes UFR Sciences et Propriétés de la Matière, Rennes. Actuellement en poste au Départ. des Sc. de la Terre, Zurich, Suisse.
- **2007-2010.** Participation au comité de thèse de la thèse de M. Koita. Encadrement : H. Jourde (Univ. Montpellier II). « Modélisation hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Cas de la région de Dimbokro, Côte d'Ivoire ». Univ. Montpellier II. Actuellement à l'Institut International d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Ouagadougou, Burkina Faso.

1.7.3. Participation à des jurys de thèse :

- **2018.** Anouck Ferroud. Encadrement : R. Chesnaux, S. Rafini. Rapporteur de la thèse. « Analyse des dimensions d'écoulement et caractérisation hydrodynamique des aquifères complexes : du pompage à l'interprétation diagnostique ». Université du Québec à Chicoutimi, Canada.
- **2011.** Mathieu Noirot. Encadrement : H. Jourde (UMII), G. Massonat (Total). Examineur. « Utilisation des données WFT pour la détermination, la mise à l'échelle et l'évaluation de l'anisotropie du champ de perméabilité d'un réservoir ». Univ. Montpellier II.

1.7.4. Co-encadrement de Master

- **2017.** François Robustelli, Master1 Univ. de Rennes (OSUR). « Synthèse de données hydrogéologiques et mesures de terrain pour caractériser les propriétés hydrodynamiques d'aquifères de socle en Bretagne ».
- **2003-2004.** Géraud Bournet, Master en Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, stage de fin d'étude au CEFIRES. Actuellement, Chargé de mission Eau et Santé, GRAIE, France.

1.8. PRINCIPALES COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES

Ici seules les collaborations scientifiques ayant donné lieu à des publications communes et/ou l'encadrement d'étudiants (thèse et Master) sont présentées.

- **Danone**, P. Lachassagne, M. Alazard. Publications : [1, 4, 20, 24].
- **Université de Rennes (OSUR)**, Olivier Bour, Luc Aquilina. Co-encadrement de la thèse de C.Roques, collaborations aux thèses de N. Guihéneuf (2014) et M. Nicolas (en cours). Publications : [7, 12, 13, 14, 16, 17].
- **Université de la Réunion**, J.L. Join. Co-encadrement de la thèse de Jeanpert. Publication [17].
- **IRD**, S. Ferrant, J-M. Vouillamoz,. Publications : [5, 19, 27]
- **National Geophysical Research Institute** (Inde). S. Chandra, S. Ahmed, K. Subrahmanyam, N.S. Krishnamurthy, F-K. Zaidi, D. Kumar. Publications : [3, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 21, 22, 23, 25, 28, 29, 30, 31, 34, 35, 37, 38, 41, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52].
- **IWMI** (Inde), M. Samad, S. Massuel. Publications : [28, 32].
- **UMII**, Lab. de Tectonophysique, F. Boudier, D. Mainprice, Publications : [39, 43].
- **Ministry of Water Resources** (Sultanat d'Oman), Z. Al-Suleimani, S. Al Hattali, A. Qatan, A. Al-Malki. Publications : [39, 40, 42].

1.9. AUTRES

- Relecteur pour des revues scientifiques : Journal of Hydrology, Hydrological Processes, Compte rendu de l'Académie des Sciences, Geological Society (London), Revue des Sciences de l'Eau (Québec), Hydrogeology Journal, Ground Water.
- Membre du Conseil d'Orientation du Mastère Spécialisé gestion de l'eau – AgroParisTech, déc.2017.
- Co-chairman, avec le Prof. Üwe Troeger (Université de Berlin, Allemagne) et le Prof. John Sharp (Université du Texas, USA) de la session « Geometrical structure and hydrogeological properties of Hard-Rock aquifers » au 43^{ème} Congrès de l'IAH, Montpellier, 25-29 septembre 2016.

1.10. LISTE DES PUBLICATIONS ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE

1.10.1. Evaluation bibliométrique

La Figure 1 présente une recherche bibliographique dans « Web of Science » de mes publications. 43 publications sont identifiées, pour un taux de citation moyen de 22,56.

La Figure 2 présente l'évolution depuis 2002 du nombre de mes publications à comité de lecture en tant que premier auteur et total, ainsi que les revues ciblées. Pour le détail, voir la liste ci-après.

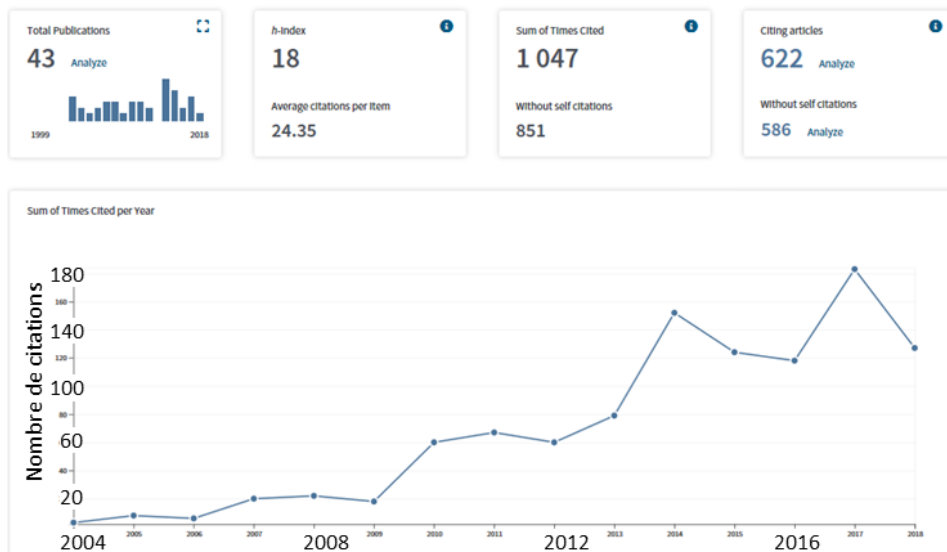


Figure 1: résultat d'une recherche dans « Web of Science », le 11 octobre 2018.

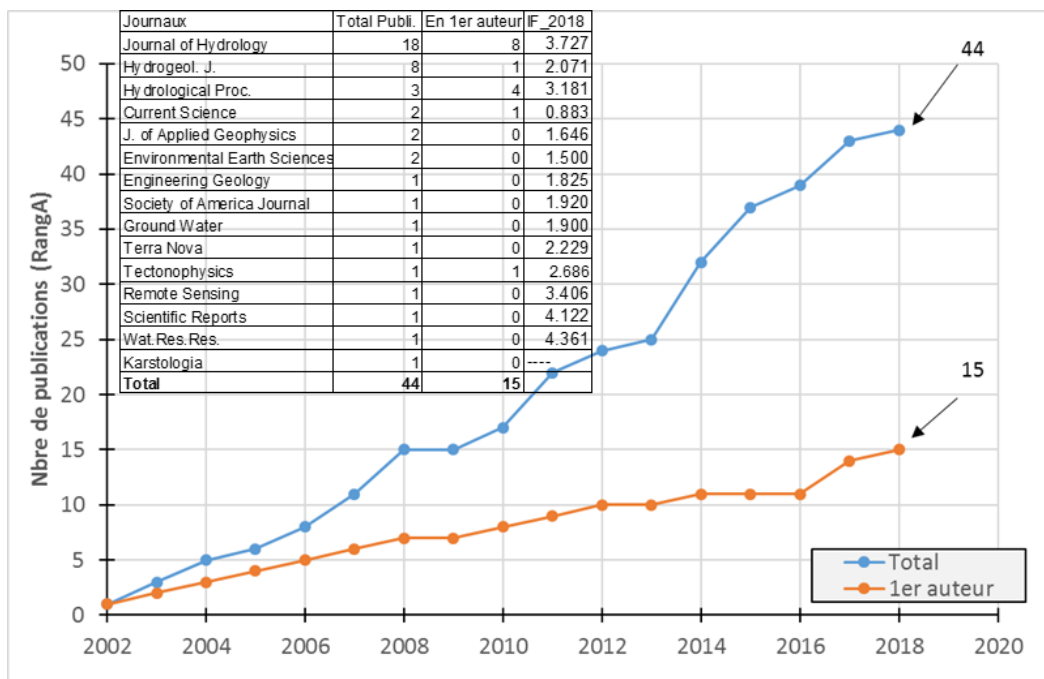


Figure 2 : évolution du nombre de publications à comité de lecture en premier auteur et total. L'insert présente les revues de ces publications et leurs facteurs d'impact (IF d'après Thomson-Reuters, 2018).

1.10.2. Liste des publications à comité de lecture

Dans le tableau ci-dessous, la colonne de droite précise le facteur d'impact de la revue (extrait de Science Citation Index by Thomson-Reuters, 2018).

	IF_2017
[1]. <u>Dewandel B.</u> , Lanini S., Lachassagne P., Maréchal J.-C., 2018. A generic analytical solution for modelling pumping tests in wells intersecting fractures. J. Hydrol. , 559, 89–99, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.013 .	3.727
[2]. <u>Dewandel B.</u> , Jeanpert J., Ladouche B., Join J.-L., Maréchal J.-C., 2017. Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map. J. Hydrol. , 550, 118–129. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.075 .	3.727
[3]. <u>Dewandel B.</u> , Caballero Y., Perrin J., Boisson A., Dazin F., Ferrant S., Chandra S., Maréchal J.-C., 2017. A methodology for regionalizing 3-D effective porosity at watershed scale in crystalline aquifers. Hydrological Processes ;1–19. doi:10.1002/hyp.11187.	3.181
[4]. <u>Dewandel B.</u> , Alazard M., Lachassagne P., Bailly-Comte V., Couëffé R., Grataloup S., Ladouche B., Lanini S., Maréchal J.-C., Wyns R., 2017. Respective roles of the weathering profile and the tectonic fractures in the structure and functioning of crystalline thermo-mineral carbo-gaseous aquifers. J. Hydrol. , 547, 690–707.	3.727
[5]. Ferrant S., Selles A., Le Page M., Herrault P.A., Pelletier C., Al-Bitar A., Mermoz S., Gascoin S., Bouvet A., Saqalli M., <u>Dewandel B.</u> , Caballero Y., Ahmed S., Maréchal J.C., Kerr Y., 2017. Detection of irrigated crops from Sentinel-1 and Sentinel-2 data to estimate seasonal groundwater use in South India. Remote Sensing , 9, 1119; doi:10.3390/rs9111119.	3.406
[6]. Alazard M., Boisson A., Maréchal J.-C., Perrin J., <u>Dewandel B.</u> , Schwarz T., Pettenati M., Picot-Colbeaux G., Kloppman W., Ahmed S., 2016. Investigation of recharge dynamics and flow paths in a fractured crystalline aquifer in semi-arid India using borehole logs: implications for managed aquifer recharge. Hydrogeol. J. , 24 (1), 35 – 57. doi:10.1007/s10040-015-1323-5.	2.071
[7]. Roques C., Bour O., Aquilina L., <u>Dewandel B.</u> , 2016. High-yielding aquifers in crystalline basement: insights about the role of fault zones, exemplified by Armorican Massif, France. Hydrogeol. J. doi:10.1007/s10040-016-1451-6.	2.071
[8]. Pauwels H., Négrel P., <u>Dewandel B.</u> , Perrin J., Mascré C., Roy S., Ahmed S., 2015. Hydrochemical borehole logs characterizing fluoride contamination in a crystalline aquifer (Maheshwaram, India), J. Hydrol. , 525, 302–312, http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.017 .	3.727
[9]. Vittecoq B., Reninger P.A., Violette S., Martelet G., <u>Dewandel B.</u> , Audru J.C., 2015. Heterogeneity of hydrodynamic properties and groundwater circulation of a coastal andesitic volcanic aquifer controlled by tectonic induced faults and rock fracturing – Martinique island (Lesser Antilles – FWI), J. Hydrol. 529, 1041–1059, http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.022	3.727
[10]. Boisson A., Marechal J.C., Perrin J., <u>Dewandel B.</u> , Ahmed, S., 2015. Impact of vertical geological structure and water table depletion on Indian crystalline aquifers, Eng. Geol. for Society and Territory , 3, 583-587.	1.825
[11]. Boisson A., Villeseche D., Baisset M., Perrin J., Viossanges M., Kloppmann W., Chandra S., <u>Dewandel B.</u> , Picot-Colbeaux G., Rangarajan R., Maréchal J.C., Ahmed S., 2015. Questioning the impact and sustainability of percolation tanks as aquifer recharge structures in semi-arid crystalline context. Envir. Earth Science , 73 (12), 7711–7721. doi:10.1007/s12665-014-3229-2.	1.500

- [12]. Boisson A., Guiheneuf N., Perrin J., Bour O., Dewandel B., Dausse A., Viossanges M., Ahmed S., Marechal J.C., 2015. Determining the vertical evolution of hydrodynamic parameters in weathered and fractured South Indian crystalline-rock aquifers: insights from a study on an instrumented site, **Hydrogeology J.**, doi:10.1007/s10040-014-1226-x. 2.071
- [13]. Dewandel B., Aunay B., Maréchal J.C., Roques C., Bour O., Mougin B., Aquilina L., 2014. Analytical solutions for analysing pumping tests in a sub-vertical and anisotropic fault zone draining shallow aquifers. **J. Hydrol.**, 509, 115–131. 3.727
- [14]. Guihéneuf N., Boisson A., Bour O., Dewandel B., Perrin J., Dausse A., Viossanges M., Chandra S., Ahmed S., Maréchal JC, 2014. Groundwater flows in weathered crystalline rocks: impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity. **J. Hydrol.**, 511, 320–334, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.061>. 3.727
- [15]. Boisson A., Baïssat M., Alazard M., Perrin J., Villessèche D., Dewandel B., Kloppmann W., Chandra S., Picot-Colbeaux G., Sarah S., Ahmed S., Maréchal J.C., 2014. Comparison of surface and groundwater balance approaches in the evaluation of managed aquifer recharge structures: Case of a percolation tank in a crystalline aquifer in India. **J. Hydrol.**, 519, 1620–1633. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.022>. 3.727
- [16]. Roques C., Aquilina L., Bour O., Maréchal J.-C., Dewandel B., Pauwels H., Labasque T., Vergnaud-Ayraud V., Hochreutener R., 2014. Groundwater sources and geochemical processes in a crystalline fault aquifer. **J. Hydrol.**, 519, 3110–3128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.052> 3.727
- [17]. Roques C., Bour O., Aquilina L., Dewandel B., Leray S., Schroetter J.M., Longuevergne L., Le Borgne T., Hochreutener R., Labasque T., Lavenant N., Vergnaud-Ayraud V., Mougin B., 2014. Hydrological behavior of a deep sub-vertical fault in crystalline basement and relationships with surrounding reservoirs. **J. Hydrol.**, 509, 42–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.023> 3.727
- [18]. Maréchal J.C., Ladouche B., Dewandel B., Fleury P., Dörfli N., 2014. Diagnostic Plots Applied to Well-Tests in Karst Systems. J. Mudry et al. (eds.), H2Karst Research in Limestone Hydrogeology, **Envir. Earth Science**, doi:10.1007/978-3-319-06139-9_9. 1.500
- [19]. Ferrant S., Caballero Y., Perrin J., Gascoin S., Dewandel B., Aulong S., Dazin F., Ahmed S., Maréchal J.-C., 2014. Projected impacts of climate change on farmers' extraction of groundwater from crystalline aquifers in South India, **Sc. Reports**, 4, 3697. doi:10.1038/srep03697 4.122
- [20]. Maréchal J.-C., Lachassagne P., Ladouche B., Dewandel B., Lanini S., Le Strat P., Petelet-Giraud E., 2013. Structure and hydrogeochemical functioning of a sparkling natural mineral water system determined using a multidisciplinary approach: a case study from southern France. **Hydrogeology J.** doi:10.1007/s10040-013-1073-1. 22p. 2.071
- [21]. Dewandel B., Maréchal J.-C., Bour O., Ladouche B., Ahmed S., Chandra S., Pauwels H., 2012. Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and efficient porosity at watershed scale in crystalline aquifers. **J. Hydrol.**, 416–471, 83–97. 3.727
- [22]. Perrin J., Ferrant S., Massuel S., Dewandel B., Maréchal J.C., Aulong S., Ahmed S., 2012. Assessing water availability in a semi-arid watershed of southern India using a semi-distributed model. **J. Hydrol.**, 460–466, 143–155. 3.727
- [23]. Dewandel B., Lachassagne P., Zaidi F.-K., Chandra S. 2011. A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock 3.727

- aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India. **J. Hydrol.**, 405, 474–487.
- [24]. 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, 2011. 2.229
- [25]. Négrel P., Pauwels H., Dewandel B., Gandolfi J-M., Ahmed A., 2011. Understanding groundwater systems and their functioning through the study of stable isotopes in a hard-rock aquifer (Maheshwaram watershed, India). **J. Hydrol.**, 397, 55-70. 3.727
- [26]. Maréchal J.C., Ladouche B., Dewandel B., Fleury P., Dörfliger N., 2011. Application de la courbe diagnostique aux essais de pompage en milieu karstique. **Karstologia**, 57, 33-36. -----
- [27]. Maréchal J-C., Vouillamoz J-M., Mohan Kumar M.S, Dewandel B., 2010. Estimating aquifer thickness using multiple pumping tests. **Hydrogeology J.**, 18 (8), 1787-1796, doi:10.1007/s10040-010-0664-3. 2.071
- [28]. Dewandel B., Perrin J., Ahmed S., Aulong S., Hrkal Z., Lachassagne P., Samad M., Massuel S.. 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, 2784-2797. 3.181
- [29]. Chandra S., Dewandel B., Dutta, S., Ahmed S., 2010. Geophysical model of geological discontinuities in a granitic aquifer: Analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences. **J. Appl. Geoph.**, 71, 137–148. 1.646
- [30]. Dewandel B., Gandolfi J-M., de Condappa D., Ahmed S., 2008. A efficient methodology for estimating irrigation return flow coefficients of irrigated crops at watershed and seasonal scale. **Hydrological Processes**, 22, 1700-1712. 3.181
- [31]. Chandra S., Ahmed S., Ram A., Dewandel B., 2008. Estimation of Hard Rock Aquifers Hydraulic Conductivity from Geoelectrical Measurements: A theoretical development with field application. **J. Hydrol.**, 357 (3-4), 218-227. 3.727
- [32]. Massuel S., Perrin J., Wajid M., Mascré C., Dewandel B., 2008. A simple low-cost method to monitor duration of groundwater pumping. **Ground Water**, doi:10.1111/j.1745-6584.2008.0051.x. 1.900
- [33]. de Condappa D., Galle S., Dewandel B., Haverkamp R., 2008. The bimodal zone of the soil textural triangle: typical of (sub-)tropical regions. Soil Science **Society of America Journ.** 72 (1), 33-40. 1.920
- [34]. Dewandel B., Gandolfi J-M., Ahmed S., Subrahmanyam K, 2007. A Decision Support Tool for sustainable Groundwater Management in semi-arid Hard-Rock areas with variable agro-climatic scenarios. **Current Science**, 92 (8), 1093-1102. 0.883
- [35]. Zaidi F., Ahmed S., Dewandel B., Marechal JC., 2007. Optimizing piezometric network in chronic estimation of groundwater budget: A case study from a granitic watershed in South India. **Hydrogeology J.**, 15 (6), 1131-1145. 2.071
- [36]. Kumar D., Ahmed S., Krishnamurthy N.S., Dewandel B., 2007. Application of geostatistics in reducing ambiguities in vertical electrical sounding interpretations. **Journ. of Appl. Geoph.**, 62, 16-32. 1.646
- [37]. Dewandel B., Lachassagne P., R. Wyns, Maréchal J.C., Krishnamurthy N.S., 2006. A generalized hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. **J. Hydrol.**, 330, 260-284, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.026. 3.727

- | | | |
|-------|--|-------|
| [38]. | Maréchal J.C., <u>Dewandel B.</u> , Ahmed S., Galéazzi L., 2006. Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture. J. Hydrol. , 329, 1-2, 281-293, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.02.022. | 3.727 |
| [39]. | <u>Dewandel B.</u> , Lachassagne P., Boudier F., Al Hattali S., Ladouche B., Pinault J.L., Al-Suleimani Z., 2005. A conceptual model of the structure and functioning of the Oman ophiolite hard-rock aquifer through a pluridisciplinary and multiscale approach. Hydrogeology J. , 13, 708-726. | 2.071 |
| [40]. | <u>Dewandel B.</u> , Lachassagne P., Qattan A., 2004. Spatial measurements of stream baseflow, a relevant methodology for aquifer characterisation and permeability evaluation. Application to a Hard-rock aquifer, the Oman ophiolite. Hydrological Processes , 18, 3391-3400. | 3.181 |
| [41]. | Maréchal J.C., <u>Dewandel B.</u> , Subrahmanyam K., 2004. Contribution of hydraulic tests at different scale to the characterisation of fracture network properties in hard-rock aquifers. Water Res. Res. , 40, W11508, 1-17. | 4.361 |
| [42]. | <u>Dewandel B.</u> , Lachassagne P., Bakalowicz, M., Wengh, P., Al-Malki A., 2003. Evaluation of Aquifer geometry using recession hydrographs analysis. J. Hydrol. , 274, pp.248-269. | 3.727 |
| [43]. | Maréchal J.C., <u>Dewandel B.</u> , Subrahmanyam K., Torri R., 2003. Review of Specific Methods for the Evaluation of Hydraulic Properties in Fractured Hard-rock Aquifers. Current Science , August 2003, vol.85, pp. 511-516. | 0.883 |
| [44]. | <u>Dewandel B.</u> , Boudier F., Kern H., Warsi W.K., Mainprice, D., 2002. Seismic wave velocity and anisotropy of serpentized peridotite in the Oman ophiolite. Tectonophysics , 370, pp. 77-94. | 2.686 |

1.10.3. Chapitres de livres

- [45]. Lachassagne P., Dewandel B., Wyns R., 2018. De l'eau souterraine dans les roches granitiques et métamorphiques ?, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/eau/eau-souterraine-roches-granitiques-metamorphiques/>. 10 p.
- [46]. Dewandel B., Gandolfi J-M., Ahmed S., Subrahmanyam K., 2007. A Decision Support Tool for sustainable Groundwater Management in semi-arid Hard-Rock areas with variable agro-climatic scenarios. In Groundwater Management – Sustainable Approaches. Ed.: Bhatnagar M. ICFAI Univ. Press, Hyderabad. 120-142.
- [47]. Maréchal J.C., Dewandel B., Ahmed S., Lachassagne P., 2007. Hard rock aquifers characterization prior to modelling at catchment scale: an application to India. In Groundwater in Fractured Rocks. IASH Publication Vol. 9. Eds: Krásný J. and Sharp J. (Eds.), Publication SP-04, Springer. 227-242.
- [48]. Maréchal J. C., Dewandel B., Subrahmanyam K., Torri R., 2007. Various pumping tests and methods for evaluation of hydraulic properties in fractured hard rock aquifers. In Groundwater dynamics in hard rock aquifers. Eds: Ahmed S., Jayakumar R., Salih A. Springer, Dordrecht. 100-111.
- [49]. Maréchal J.C., Zaidi F. K., Dewandel B., 2007. Analyses of aquifer parameters from different hydraulic tests and their scale effect. In Groundwater dynamics in hard rock aquifers. Eds: Ahmed S., Jayakumar R., Salih A. Springer, Dordrecht. 112-122.
- [50]. Maréchal J.C., Galeazzi L., Dewandel B., 2007. Groundwater balance at the watershed scale in a hard-rock aquifer using gis. In Groundwater dynamics in hard rock aquifers. Eds: Ahmed S., Jayakumar R., Salih A. Springer, Dordrecht. 134-141.
- [51]. Zaidi F.K., Dewandel B., Gandolfi J-M., Ahmed S., 2007. Water budgeting and construction of future scenarios for prediction and management of groundwater under stressed condition. In Groundwater dynamics in hard rock aquifers. Eds: Ahmed S., Jayakumar R., Salih A. Springer, Dordrecht. 142-149.

- [52]. Maréchal J. C., Dewandel B., Subrahmanyam K., 2007. Characterization of fracture properties in hard rock aquifer system. In Resource evaluation, augmentation, contamination, restoration, modeling and management. Ed: Thangarajan M. ,Springer, Dordrecht. 156-188.

1.10.4. Articles de vulgarisation scientifique

- Gutierrez A., Dewandel B., 2014. L'interprétation des pompages d'essai : quelles nouveautés ? Géologues, 178, 49-53.
- Dewandel B., Ladouche B., Maréchal JC., Vigouroux Ph., 2013. Approche interdisciplinaire pour la caractérisation des gisements d'eau minérale et autres hydrosystèmes complexes. Géologues, 175, 50-53.
- Lachassagne P., Ahmed S., Dewandel B., Gandolfi J.M., Maréchal J.C., Wyns R., 2006. Les aquifères fissurés. Les roches de socle. Géochronique, Dossier « les eaux souterraines », 38-41.
- Lachassagne P., Maréchal JC., Ahmed S., Dewandel B., Gandolfi JM., Krishnamurthy N.S., Subrahmanyam K, Wyns R., 2005. Nouveaux outils et méthodes pour gérer et protéger la ressource en eau souterraine des régions de socle. Hydroplus, 150, 54-57.
- Dewandel B., Boudier F., Lachassagne P., Al-Khamisi S., Al-Hattaly S., 2000. Les eaux souterraines de l'ophiolite d'Oman. Nouvelles Scientifiques de France et du Proche Orient. Août 2000, 27-33.

1.10.5. Brevet

Un brevet déposé en février 2018: « Procédé de pompage d'un réservoir souterrain fracturé ; généralisation de solutions de fractures ».

1.10.6. Conférences et Proceedings

76 documents ; voir en annexe.

1.10.7. Liste des rapports

- Rapport de thèse :

Dewandel B., 2002. Structure et fonctionnement hydrogéologique d'un aquifère discontinu: l'ophiolite d'Oman. ISTEEM Publication, Mémoires Géosciences-Montpellier n°26, 328 + 289 p.

- **Rapports R&D (public)**, cofinancements : Agences de l'Eau, ANR, régions, départements, FEDER, Europe-AID, CEFIPRA..., 9 rapports ; voir annexe.
- **Rapports R&D (industriels)**, financement : Danone, Nestlé, Total, 11 rapports ; voir annexe.
- **Rapport de service public**, cofinancements : Agences de l'Eau, ONEMA (AFB), ADEME, CEA, régions, départements, DOM-TOM, communes, syndicats..., 42 rapports ; voir annexe.
- **Rapports (industriels)**, financement : Danone, 4 rapports ; voir annexe.
- **Rapports expertises – avis techniques** (DREAL, DDT, Assurance), 7 rapports ; voir annexe.

2. Synthèse des travaux

Les références entre [xx] renvoient à la liste de mes publications (§ 1.10). Celles présentant un astérisque () sont disponibles en annexe (références n°1, 2, 13, 21, 37).*

Mes activités de recherche et d'expertise se déclinent suivant trois axes majeurs : les modèles conceptuels de fonctionnement hydrogéologique des aquifères de socle, l'interprétation et la modélisation des essais par pompage, dont certaines méthodes sont dédiées à ce type d'aquifère, et le développement de méthodes pour spatialiser les propriétés hydrodynamiques de ces aquifères.

2.1. LES AQUIFERES DE SOCLE - MODELES CONCEPTUELS HYDROGEOLOGIQUES

Les roches de socle (granites, roches métamorphiques : schistes, gneiss, etc.) occupent des surfaces importantes tant à l'échelle du globe (Afrique, Amérique du Nord et du Sud, Inde, Asie, Australie) qu'à l'échelle européenne ou française. Les aquifères que ces formations renferment sont généralement compris dans les 100 premiers mètres depuis la surface (Detay et al., 1989). Les ressources en eau souterraine y sont généralement modestes en termes de débit exploitable à chaque forage (de quelques m³/h en général à parfois quelques dizaines de m³/h) par comparaison avec les autres types d'aquifères (alluvions, bassins sédimentaires, karstiques, volcaniques). Néanmoins, elles sont bien réparties géographiquement et, de ce fait, bien adaptées à l'habitat souvent dispersé des régions de socle. Elles participent donc significativement au développement économique des régions rurales concernées, en particulier en contexte aride ou semi-aride où le recours aux eaux de surface est limité (Uhl et Sharma, 1978 ; Gustafson et Krásný, 1994 ; Houston et Lewis, 1998).

2.1.1. Modèle conceptuel à l'échelle du bassin versant ou régional

La présence d'eau dans le socle et en particulier au sommet de la roche indurée, sous les argiles d'altération, est connue de façon empirique par les hydrogéologues et les foreurs, car c'est au sommet de la roche dure qu'apparaissent généralement les premières venues d'eau. Plusieurs hypothèses ont été formulées pour expliquer l'origine de cette fracturation, fentes de retrait issues du refroidissement magmatique ou de l'activité tectonique (Houston et Lewis, 1988 ; Taylor et Howard, 2000) ou encore décompression par érosion (Davis et Turk, 1964 ; Acworth, 1987 ; Wright, 1992). Il en résultait ainsi un modèle conceptuel hydrogéologique vertical où la présence d'eau n'était liée qu'à la présence de structures verticales, souvent d'origine tectonique, et déconnectées les unes des autres (Figure 3). Cependant, celui-ci n'expliquait pas la présence récurrente de nombreux forages productifs distribuer de façon aléatoire d'un point de vue spatial et les forts volumes prélevés, par exemple jusqu'à plus de 0,2 Mm³/km²/an dans des zones planes sans activité tectonique en Inde (granite, [24, 38]). Depuis les deux à trois dernières décennies, les connaissances sur la genèse, la géométrie et le fonctionnement des aquifères de socle ont fait l'objet de progrès très significatifs, en montrant le rôle joué par les phénomènes d'altération supergène (Chilton et Smith Carrington, 1984 ; Chilton et Foster, 1995 ; Wyns et al., 1999, 2004 ; Taylor et Howard, 2000 ; Braun et al., 2009, 2016 ; Lachassagne et al., 2001a, 2015 ; Courtois et al., 2010, [24, 27, 37*, 41, 45, 47-49, 52]). Ces processus impliquent l'hydrolyse biogéochimique des minéraux constituant la roche mère et leurs transformations minéralogiques à l'équilibre des conditions de surface, principalement en matériaux riches en argile (Tardy, 1971, 1993 et 1998 ; Nahon, 1991).

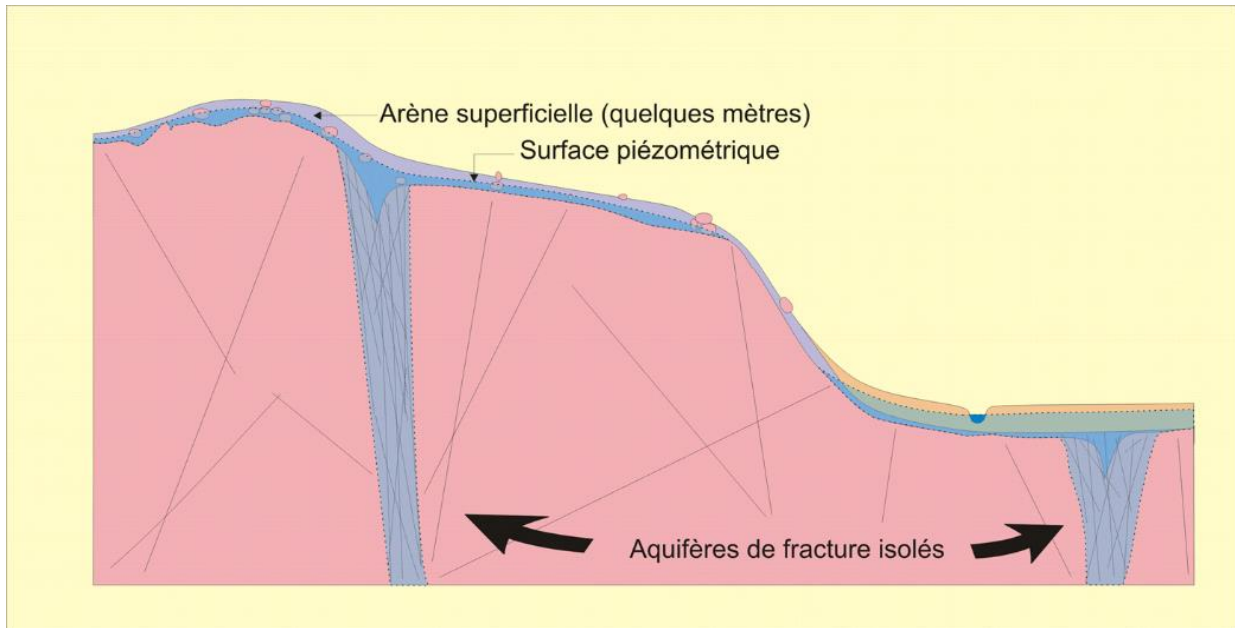


Figure 3 : modèle conceptuel « ancien » des aquifères de socle, déconnecté (tiré de Lachassagne et Wyns, 2005).

Dans les roches granitiques (granites, gneiss), le profil d'altération caractéristique comprend deux principaux horizons stratiformes, les saprolites ou altérites meubles et un horizon fracturé, sub-parallèles à la paléo-surface contemporaine des processus d'altération (Figure 4 ; Wyns et al., 1999, 2004).

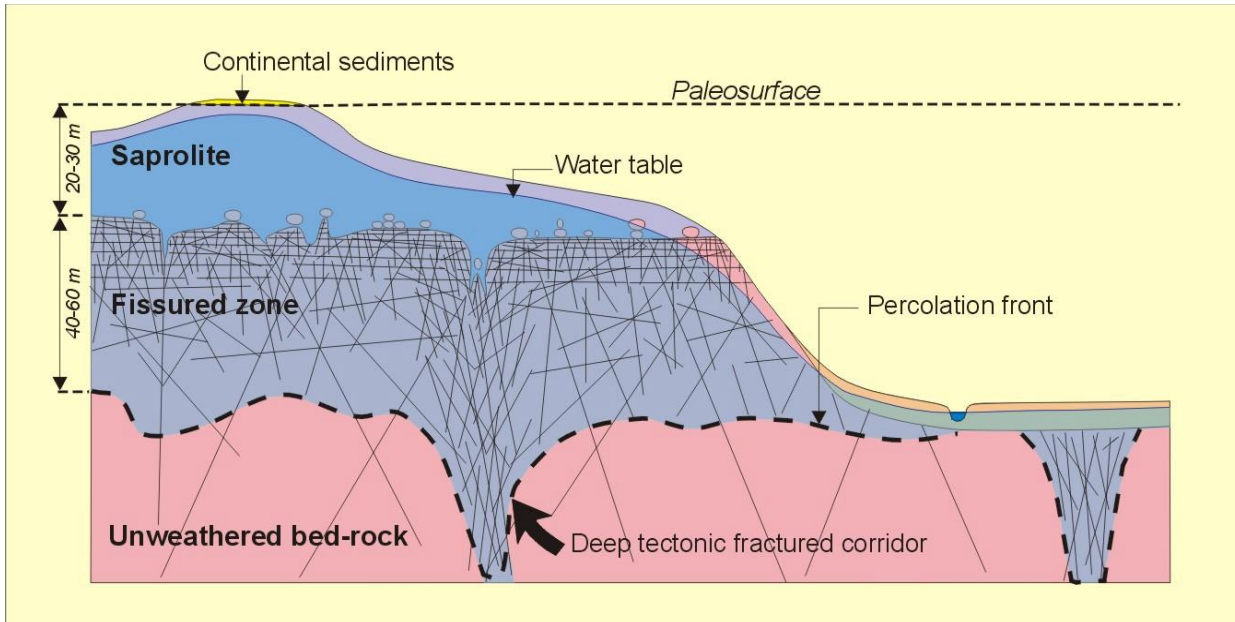


Figure 4 : modèle conceptuel des aquifères de socle (tiré de Wyns et al., 1999, 2004).

Le profil d'altération constitue donc un aquifère composite où chaque niveau a ses propres spécificités hydrodynamiques [37*]. Du haut vers le bas, il comprend :

- 1- une **cuirasse ferrugineuse ou bauxitique** (Figure 5), d'épaisseur métrique à plurimétrique. Celle-ci peut être absente car érodée ou transformée en latosol par réhydratation de l'hématite (cas des cuirasses ferrugineuses), ou en kaolinite par une silification de la gibbsite/boémite (cuirasse bauxitique).



Figure 5 : cavité souterraine plurimétrique creusée en base de cuirasse (granodiorite, Guyane française).

- 2- **un horizon de saprolite (altérites ; Figure 6)**, un matériau meuble riche en matériaux argileux issus de l'altération in situ de la roche mère. Celui-ci est en général d'une épaisseur de quelques dizaines de mètres. Cet horizon est divisé en deux sous-unités : l'allotérite et l'isaltérite (Wyns et al., 1999). L'allotérite est un horizon riche en argile qui a subi une importante réduction de volume en conséquence d'un fort degré d'altération. Dans ce niveau la structure de la roche mère (orientation des minéraux) est perdue (Jones, 1985 ; White et al., 2001). Dans l'isaltérite sous-jacente, les processus d'altération n'ont induit qu'un faible changement de volume, la structure originelle de la roche mère est donc préservée. Dans la plupart des cas ce niveau constitue la moitié ou les deux tiers de l'épaisseur de saprolite. Dans les roches plutoniques, comme les granitoïdes, le niveau inférieur des isaltérites est laminé. Ce dernier niveau est relativement consolidé, sa texture est de type granulo-sableuse avec une lamination millimétrique recoupant les plus gros minéraux (feldspath par exemple) ; la structure originelle de la roche y est très bien préservée.

De par la composition sablo-argileuse des saprolites, ce niveau peut avoir une porosité importante qui dépend de la composition de la roche mère. La porosité efficace varie généralement de quelques pourcents à 10% (Bodelle et Margat 1980 ; Compaore et al., 1997, Wyns et al., 2004). Cependant et du fait de la présence de matériaux argileux ce niveau est relativement peu perméable, de 10^{-7} à 3×10^{-5} m/s (2×10^{-6} m/s en moyenne ; [37*]). Quand les saprolites sont saturées celles-ci constituent la fonction capacitive de l'aquifère.



Figure 6 : a) horizon laminé (sapolite, granite). b) détail, les minéraux ont gardé leur orientation originelle.

- 3- **un horizon fracturé sous-jacent** (Figure 7) qui est caractérisé par une importante densité de fractures subhorizontales dans les premiers mètres à dizaines de mètres, et par une diminution rapide de la densité des fractures subhorizontales et subverticales (Houston et Lewis, 1998 ; Howard et al., 1992 ; Wyns et al., 2004 ; [24, 37*, 41]). Des travaux récents ont démontré que l'origine de ces fractures étaient à mettre en relation avec le gonflement, sous l'effet de l'altération, de certains minéraux, (Wyns et al., 2004 ; [24, 37*, 41]). Ce gonflement a pour effet de provoquer une augmentation locale de la contrainte qui favorise le développement de micro-fissures puis de fractures (Vasseur et Lachassagne, 2018). Dans les roches granitiques, le minéral le plus sensible à ce processus est la biotite (Eggeler et al., 1969, Ledger et Rowe, 1980). Ainsi tout comme les niveaux d'altération précédents, l'horizon fracturé est issu de l'altération in-situ de la roche mère : il fait donc partie intégrante du profil d'altération. Dans les roches fortement foliées (gneiss ou schistes), l'orientation des fractures peut aussi être contrôlée par la structure primaire de la roche (Pye 1986 ; Sharma et Rajamani 2000). Cet horizon assure la fonction transmissive de l'aquifère.

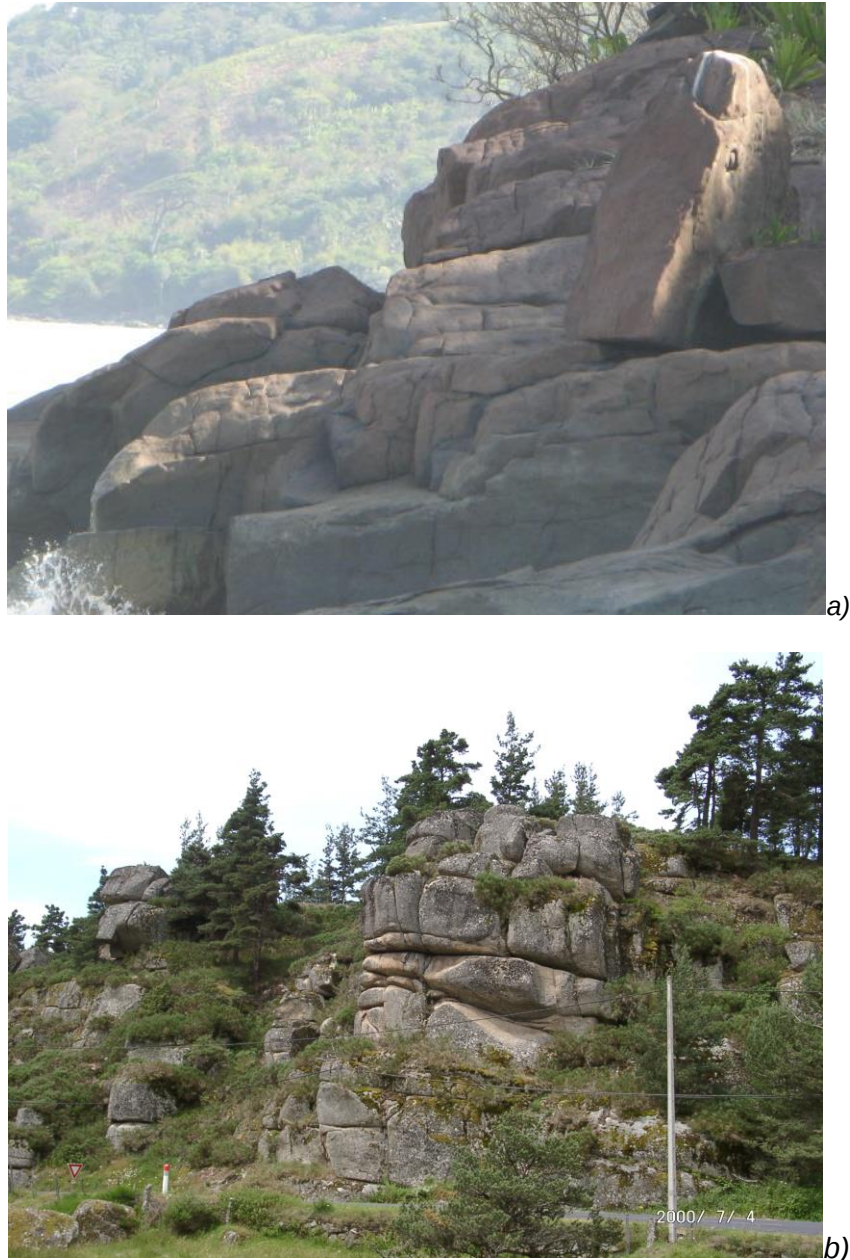


Figure 7 : exemples d'horizons fracturés. a) granodiorite, Guyane; b) granite, Lozère (© R. Wyns).

- 4- Le **substratum rocheux non-fracturé** sous-jacent n'est perméable que localement au droit de structures tectoniques (failles, filons) et présente en moyenne une très faible densité de fractures comparé à l'horizon fracturé. La plupart des auteurs considèrent que sa perméabilité est très variable (Pickens et al., 1987 ; Blomqvist 1990 ; Walker et al., 2001 ; Kuusela-Lahtinen et al., 2003 ; Cho et al., 2003). L'écoulement des eaux souterraines peut y être fractionné, c'est-à-dire contrôlé par l'orientation de ces structures (Leveinen et al., 1998).

L'ensemble de ces travaux, auxquels j'ai participé, montrent que, quand les roches ont été soumises aux processus d'altération (altération in-situ), la structure géométrique et les propriétés hydrodynamiques de ces aquifères résultent des processus d'altération de la roche en place. En conséquence, et là où les roches de socle ne sont pas affectées par des discontinuités géologiques (failles, pegmatites, aplites ou dykes), les saprolites et la zone fracturée forment un aquifère composite superficiel (de 30 à 100 m d'épaisseur en moyenne) qui peut être considéré

comme un système multicouche où chaque niveau est caractérisé par ses propres et relativement homogènes propriétés hydrodynamiques. Ce concept d'aquifère stratiforme trouve de nombreuses applications pratiques dans le domaine de l'hydrogéologie, depuis l'échelle régionale pour la cartographie des potentialités en eau souterraine (Lachassagne et al., 2001a ; Courtois et al., 2010), jusqu'à celle de la gestion de la ressource en eau au niveau du bassin versant, sujet incontournable dans les contextes d'exploitation intensive [30, 38, 34, 35, 46, 50]. De plus, ce concept a permis l'amélioration des techniques et méthodes d'implantation de forages productifs (e.g. Lachassagne et al., 2001a, b ; Krishnamurthy et al., 2002, 2003 ; Reddy et al., 2006, [36]).

2.1.2. Description des propriétés hydrodynamiques de l'horizon fracturé - exemple de l'aquifère granitique de Maheshwaram (Inde)

Les 47 slug-tests - essais de faible investigation destinés à caractériser l'aquifère dans un rayon de quelques mètres autour du forage testé - réalisés sur un aquifère granitique représentatif de la zone fracturée du profil d'altération en Inde du Sud (Maheshwaram ; Figure 8) ont permis une première caractérisation de la perméabilité de ce type d'aquifère. Sa distribution est structurée et clairement log-normale (Figure 9). La perméabilité de cet horizon varie de 2×10^{-7} à 5×10^{-4} m/s et est en moyenne de 6×10^{-4} m/s (moyenne géométrique). Parmi les ouvrages testés, quelques-uns n'ont pas recoupé de fractures productives et renseignent par conséquent sur la perméabilité des blocs, de l'ordre de 10^{-8} m/s.

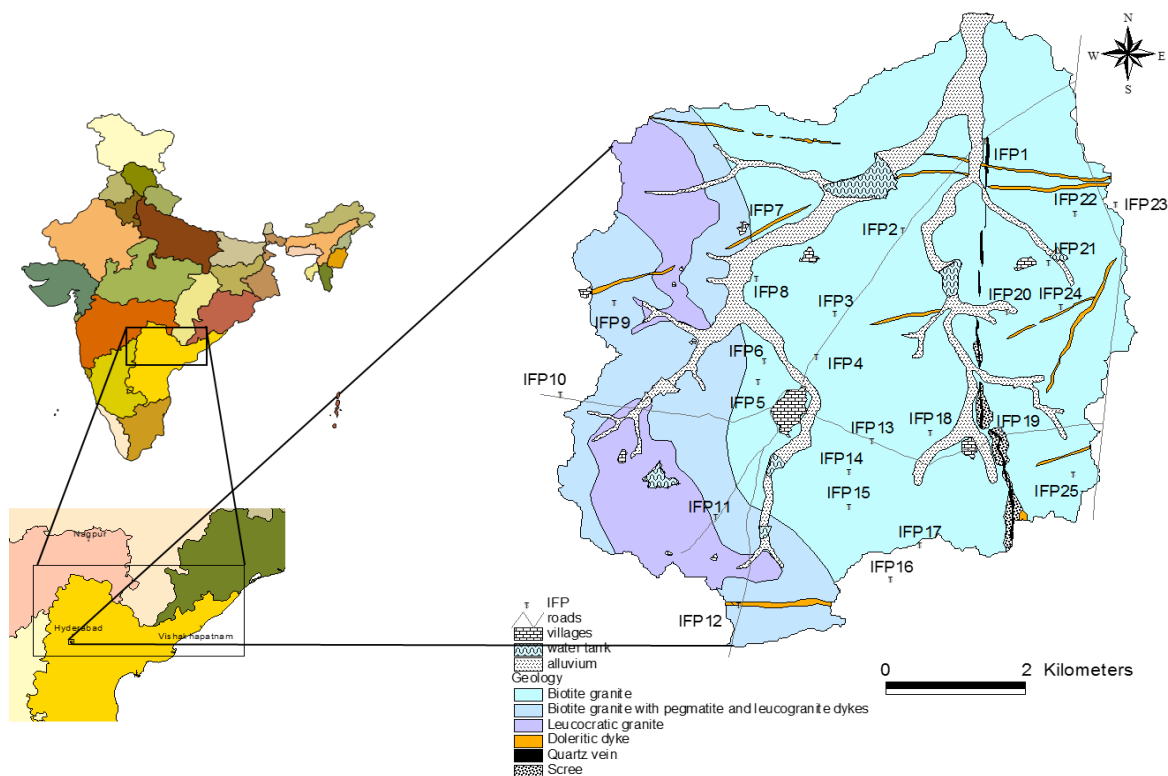


Figure 8 : localisation du bassin versant de Maheshwaram, granite, Inde.

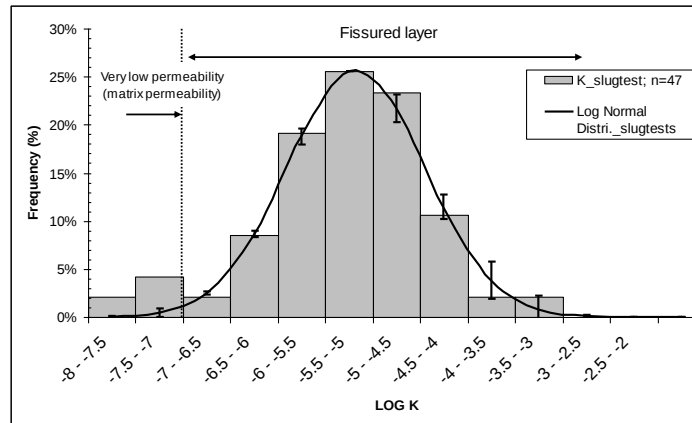


Figure 9 : distribution des perméabilités au sein de l'horizon fracturé à partir d'essais slug-tests sur 47 ouvrages ; granite Inde (tiré de [21*, 41]).

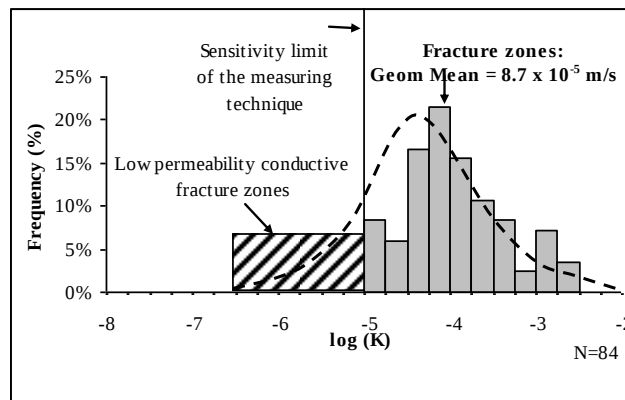


Figure 10 : perméabilités des zones productives déduites des essais au micro-moulinet (N=84; tiré de [37*, 41]).

La Figure 10 présente la distribution de la perméabilité des fractures productives sur les mêmes ouvrages que ceux de la figure précédente. Ces valeurs ont été acquises suite à la réalisation de mesures au micro-moulinet lors d'injection d'eau. La distribution des perméabilités est là aussi log-normale. La perméabilité de ces zones de fractures varie de 10^{-6} à 3×10^{-3} m/s et est en moyenne de 6×10^{-5} m/s (moyenne géométrique).

La distribution des perméabilités, qu'elle soit sur l'ensemble des ouvrages (Figure 9) ou sur les fractures productives elles-mêmes (Figure 10), montre qu'au sein de l'horizon fracturé la distribution des perméabilités n'est pas aléatoire ce qui indique une distribution structurée du réseau de fractures. D'autre part, la distribution de la perméabilité des fractures est bien organisée suggérant qu'un processus similaire est à l'origine de l'acquisition de la perméabilité et donc qu'un phénomène commun est à l'origine de la création des fractures : l'altération supergène.

D'autres séries de tests hydrauliques effectués à des échelles d'investigation plus grandes – essais par injection et pompages d'essai – ont été réalisées sur cet aquifère ([27, 37*, 41, 43, 48, 49, 52]. L'interprétation de l'ensemble des tests hydrauliques a permis de proposer un modèle conceptuel des propriétés hydrodynamiques de la zone fracturée des aquifères de socle (Figure 11).

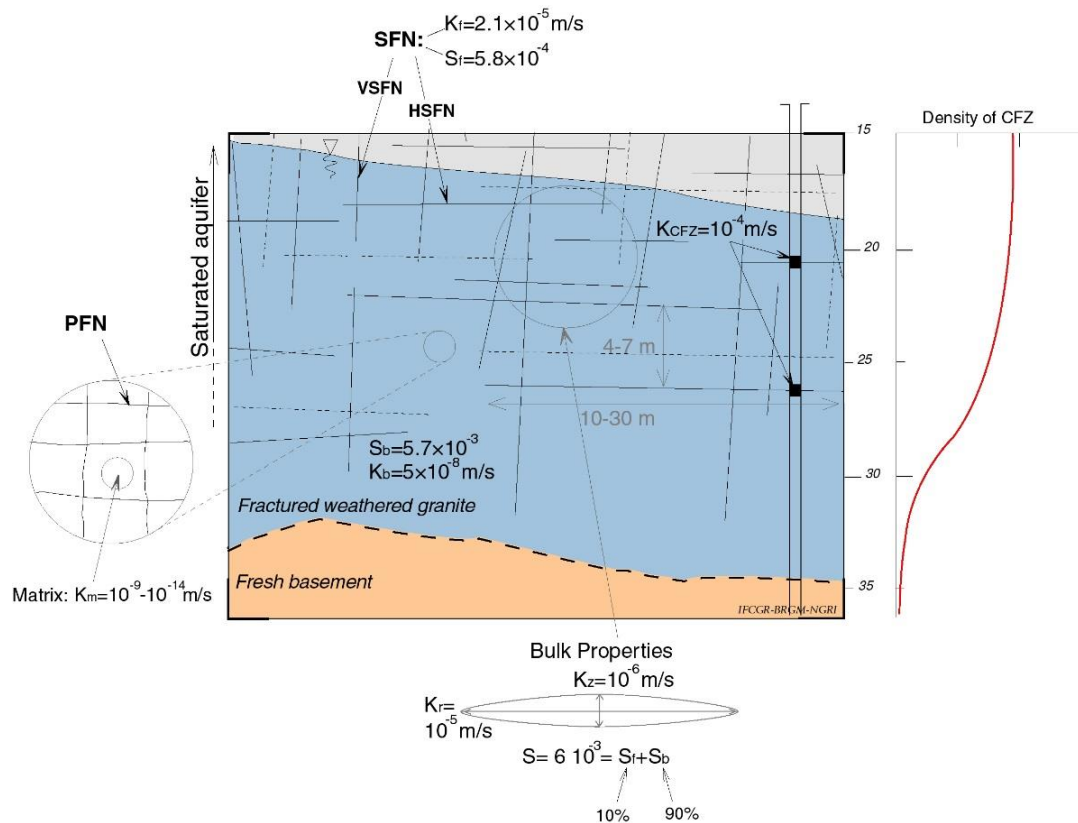


Figure 11 : modèle conceptuel des propriétés hydrodynamiques de la zone fracturée des aquifères de socle en contexte granitique (tiré de [41]).

A partir des essais par pompage réalisés dans cet horizon fracturé, essais de quelques heures à un ou deux jours de pompage, et interprétés avec des méthodes tenant compte du caractère fracturé de la formation - modèle double porosité (Warren et Root, 1966 ; Figure 12), anisotropie verticale de perméabilité (Neuman, 1972, 1975), fracture horizontale unique (Gringarten et Ramey, 1974) et modèle à écoulements fractionnalisés (Barker, 1988)- deux réseaux de fractures conductrices ont été mis en évidence. Le premier, PFN (Primary Fracture Network), est le réseau primaire de fractures qui n'affecte que la matrice à une échelle décimétrique. La perméabilité de ce réseau, et donc des blocs, est faible, $K_{\text{bloc}} \sim 10^{-8}$ m/s. Le second réseau, SFN, découpe les blocs à une échelle pluri-métrique. Le SFN (Secondary Fracture Network) est lui-même composé de deux réseaux de fractures conductrices, un réseau subhorizontal (HSFN) et un subvertical (VSFN), ce qui est cohérent avec les observations géologiques (voir par exemple Figure 7). La densité verticale du réseau de fractures horizontales varie de 0,15 à 0,24 m^{-1} , pour des fractures longues de quelques dizaines de mètres tout au plus. La perméabilité globale horizontale de la zone fracturée est estimée à $K_r : 10^{-5}$ m/s. Le réseau de fractures sub-verticales permet d'assurer la connexion avec les fractures horizontales. Cependant, ce dernier est moins perméable, $K_z : 10^{-6}$ m/s, introduisant ainsi une anisotropie de perméabilité d'un facteur 10 environ ce qui n'est pas sans rappeler les observations de terrain.

La partie sommitale de l'horizon fracturé est cependant plus fracturée que la partie sous-jacente, la densité de fractures productives peut être aussi importante que 0,6 m^{-1} (1,7 fracture productive par mètre en moyenne, [37*]). Cependant, les propriétés intrinsèques aux fractures restent semblables à celles localisées plus en profondeur. Epaisse de deux mètres environ dans le cas de cet horizon fracturé en Inde, elle peut attendre plus de 10 m là où le profil a pu se développer plus en profondeur (Bretagne, Wyns et al., 2004). Comme elle est plus fracturée, cette zone est la plus perméable du profil (5×10^{-5} m/s).

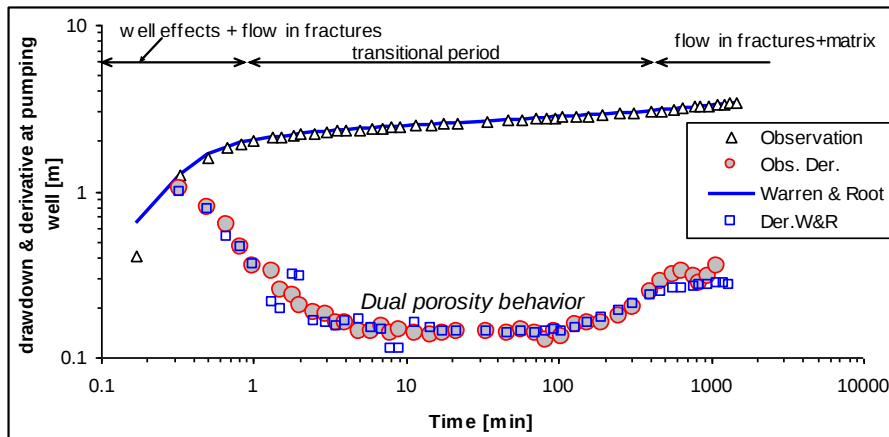


Figure 12 : pompage dans l'horizon fracturé stratiforme d'un granite (Inde ; tiré de [41]). Mise en évidence du comportement double porosité de l'aquifère. Modèle : double porosité (Warren & Root [W&R]). Der. : dérivée (observation et modèle).

La porosité efficace de l'horizon fracturé est généralement faible, de 10^{-3} à 10^{-2} [21*, 28, 38, 41] et est principalement assurée, à 90 %, par les blocs de faible perméabilité et les zones altérées constituant les épontes des fractures. Le réseau de fractures ne contribue qu'à environ 10% de la porosité efficace [41]. Comme pour la perméabilité, la densité de fractures joue un rôle très important sur la valeur de la porosité efficace, sous-entendant que les zones à forte porosité efficace sont associées à une densification de la fracturation. Ceci s'explique d'une part par l'augmentation du nombre de fractures et, d'autre part, par l'augmentation des faciès altérés associés aux épontes.

2.1.3. Généralisation des propriétés hydrodynamiques aux autres profils d'altération

La comparaison des données de perméabilité de plusieurs profils d'altération provenant de contextes granitiques et gneissiques de divers points du globe [37*], en particulier en Afrique et en Inde, montrent relativement peu de différences entre ces propriétés (Figure 13). L'horizon de saprolite est caractérisé par une perméabilité variant de 10^{-7} à 5×10^{-6} m/s en fonction de sa teneur en matériaux argileux (moyenne : 3×10^{-6} m/s) et celle de la zone fracturée entre 10^{-6} et 10^{-4} m/s en fonction vraisemblablement de la densité de fractures productives (moyenne : 10^{-5} m/s). Ces caractéristiques hydrodynamiques, finalement relativement homogènes en regard du profil d'altération étudié, montrent que lorsque les formations granitiques et gneissiques ont subi une altération supergène, la perméabilité de l'aquifère est très similaire, et ce quelle que soit leur localisation. Ceci suggère donc que le modèle hydrodynamique conceptuel décrit précédemment (Figure 11) est relativement robuste et généralisable à l'ensemble des profils en domaine granitique et gneissique.

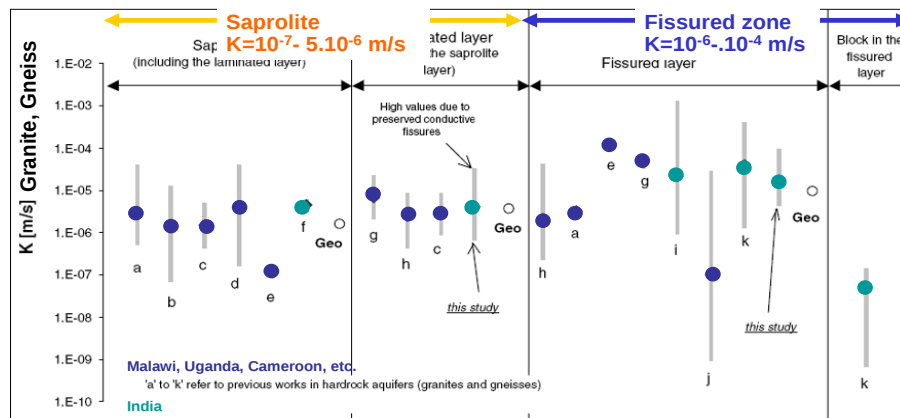


Figure 13 Hydraulic conductivity of the sapolite and the fissured layer in hard-rock (from Tables 5 and 6); the black circles denote the geometrical means and the vertical bars the variability of measurements for each study. a: Houston and Lewis (1988), b: Compaore et al. (1997), c: McFarlane (1992), d: Wright (1992), e: Jones (1985), f: Rushton and Weller (1985), g: Chilton and Smith-Carington (1984), h: Taylor and Howard (2000), i: Maréchal et al. (2004), j: Howard et al. (1992), k: Uhl and Sharma (1978). Geo (open circle): geometrical mean of each layer: entire sapolite layer: 2×10^{-6} m/s, laminated layer (base of the sapolite layer): 3×10^{-6} m/s, fissured layer: 9×10^{-6} m/s and block within the fissured layer: 5×10^{-8} m/s.

Figure 13 : valeurs de perméabilité de la saprolite et de la zone fracturée (granites et gneiss) ; tiré de [37*]. Données bibliographiques issues de tests hydrauliques, saprolite : 134 tests, zone fracturée : 234 tests. « this study » : cas de l'aquifère granitique de Maheshwaram (Inde).

2.1.4. Rôle d'une altération polyphasée sur les propriétés hydrodynamiques - exemple de l'aquifère granitique de Maheshwaram (Inde)

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents l'altération joue un rôle primordial dans l'acquisition des propriétés hydrodynamiques des roches de socle. Si d'ordinaire une altération monophasée et suffisamment longue, c.-à-d. sur plusieurs dizaines de millions d'années, génère d'épais profils d'altération dans les roches de socle (> 100m) une altération polyphasée entrecoupée de phases d'érosion donnera naissance à une géométrie substantiellement différente. La Figure 14, extraite de la publication [37*] disponible en annexe, montrent l'évolution d'un de ces profils. Dans de telles conditions, les profils résultent de l'érosion partielle d'anciens profils puis de leur ré-altération. En Inde du Sud par exemple, le profil d'altération actuel est hérité d'un ancien profil daté au moins du Jurassique-Crétacé qui a été érodé et ré-altéré plusieurs fois au cours de l'histoire géodynamique régionale (Figure 14) : séparation Inde-Gondwana, passage au-dessus du point chaud de la Réunion et collision Inde-Asie. Durant chacun de ces épisodes tectoniques le profil fût incisé du fait d'une surrection du relief, et par contre, pût se redévelopper lors des périodes de calme tectonique. A l'heure actuelle on suppose qu'il ne reste du profil jurassique-crétacé qu'une petite partie de la zone fracturée.

D'un point de vue géométrique, le profil d'altération polyphasé est nettement moins épais et sa structure n'est plus décrite par une grande surface plane et tabulaire mais par un profil plutôt subparallèle à la topographie actuelle (Figure 15). Le profil vient donc « napper » la surface actuelle. Par contre, les horizons altérés sont toujours subparallèles entre eux. Comparé au profil monophasé, les épaisseurs de saprolite sont anormalement importantes par rapport à celles de la zone fracturée (ratio 1/2 au lieu de 1/3). De plus, le profil peut être incomplet, dans cet exemple il n'y a quasiment pas de saprolite meuble (allotérite) et de nombreuses fractures productives demeurent encore dans la saprolite alors que dans un profil monophasé ces fractures ne sont plus perméables car oblitérées par l'altération.

Du point de vue des propriétés hydrodynamiques, la perméabilité et la densité des zones de fractures productives ne sont pas significativement différentes de celles que l'on peut observer sur les profils monophasés. La principale différence résulte surtout en termes de transmissivité, combinaison de la perméabilité des zones de fractures productives avec leur nombre, du fait

d'importantes variations de l'épaisseur totale du profil. Ceci est aussi valable pour la partie supérieure plus perméable de l'horizon fracturé qui est réduite dans le cas d'un profil polyphasé. Par contre, les nombreuses fractures conductrices dans le niveau de saprolite du profil polyphasé donnent à cet horizon un caractère beaucoup plus perméable, mais hétérogène, comparé à son homologue du profil monophasé.

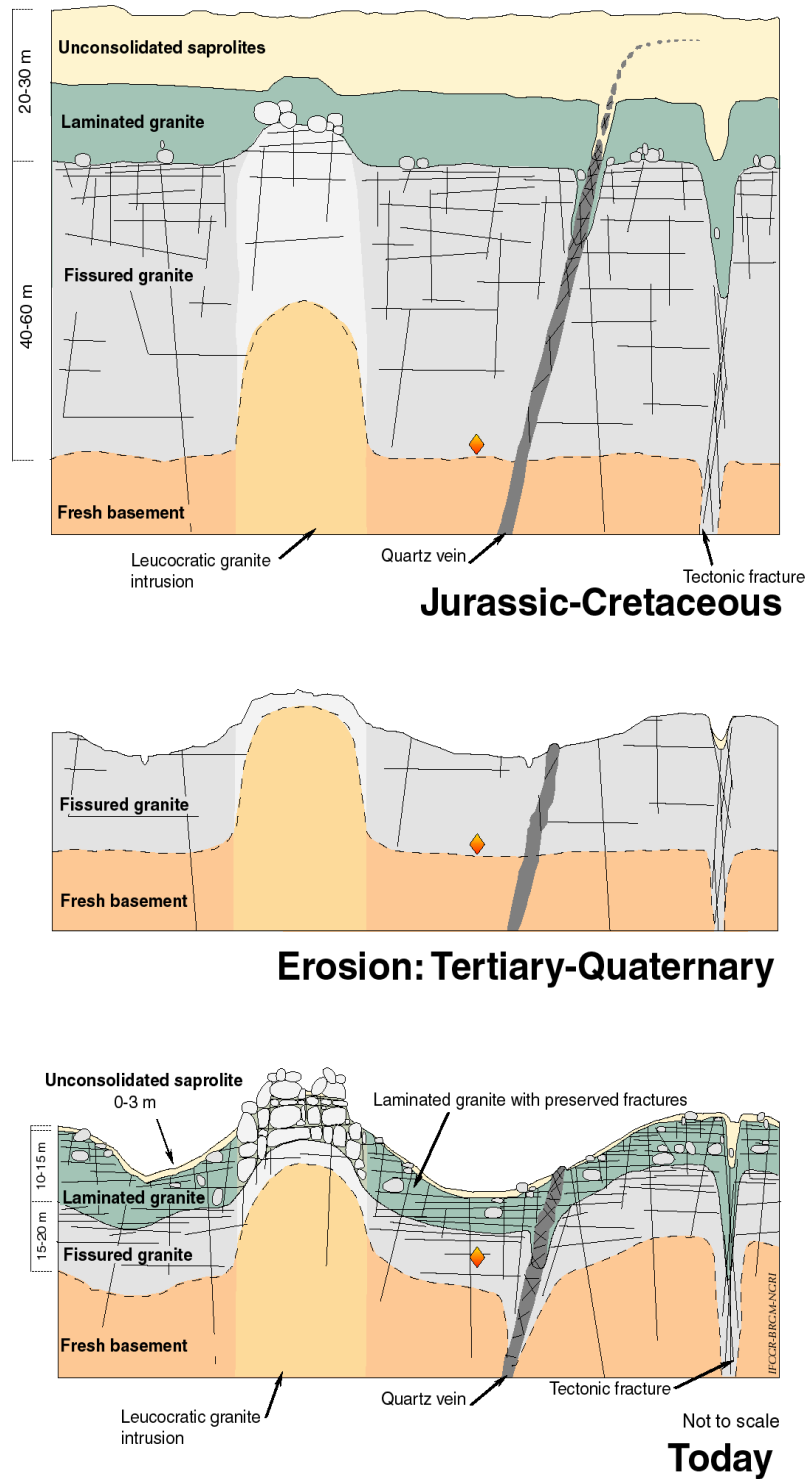


Figure 14 : évolution probable du profil d'altération depuis le Jurassique-Crétacé à l'actuel en Inde du Sud (granite, tiré de [37*]).

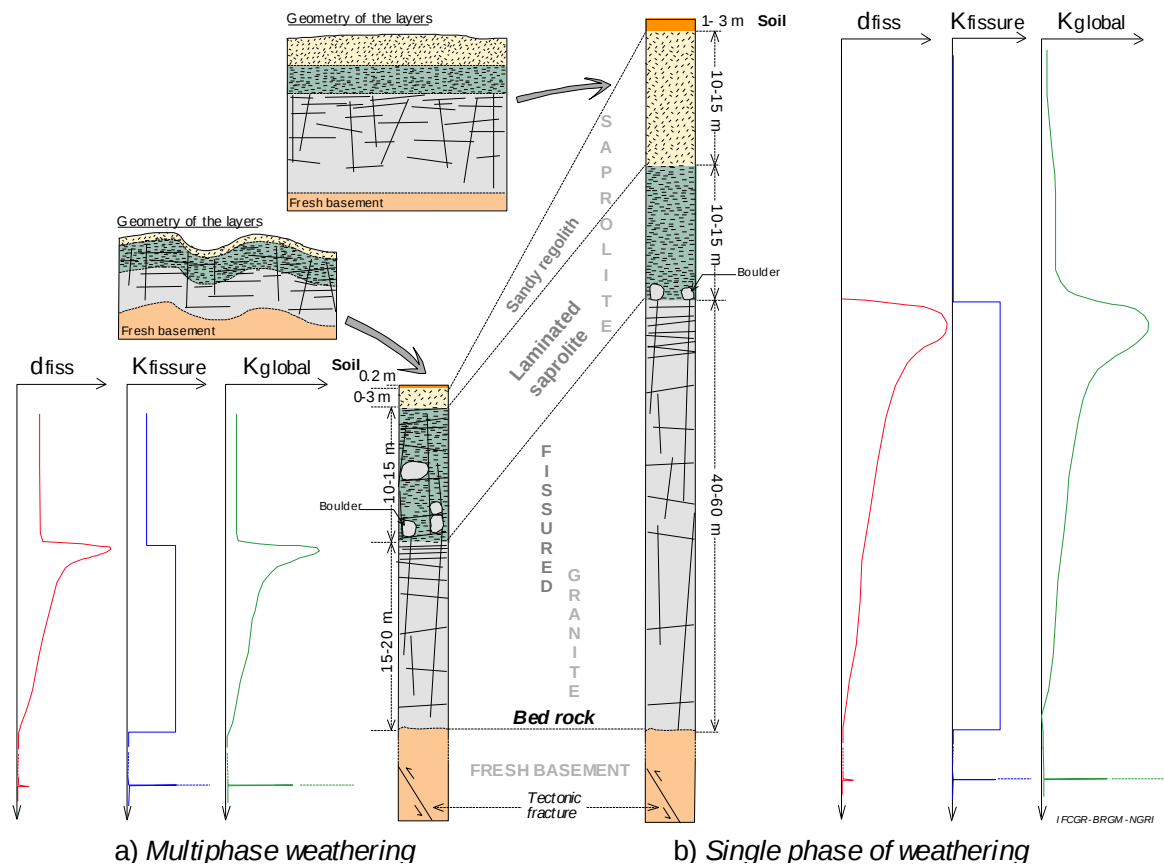


Figure 15 : modèle conceptuel géologique et hydrogéologique des aquifères granitiques contrôlé par une ou plusieurs phases d'altération (tiré de [37*]).

2.1.5. Rôle des hétérogénéités sur la géométrie et les propriétés hydrodynamiques des aquifères de socle : cas d'un filon de quartz décamétrique

Les modèles conceptuels précédemment exposés décrivent l'hydrodynamisme global des aquifères de socle là où l'altération supergène a créé d'épais profils. Cependant, ceux-ci ne décrivent pas le fonctionnement hydrogéologique de structures géologiques perméables locales telles que peuvent l'être les failles et certains filons (aplite, pegmatite). Ces cibles, pourtant convoitées depuis toujours par les hydrogéologues pour l'implantation d'ouvrages de production (voir par exemple Sander, 2007, [7 ; 17]), sont cependant relativement méconnues du point de vue de leur fonctionnement hydrodynamique. Le paragraphe suivant décrit et explique pourquoi certaines hétérogénéités géologiques peuvent être d'intéressantes cibles hydrogéologiques au travers de l'exemple d'un filon de quartz en Inde épais d'une vingtaine à une quarantaine de mètres intrudant des granites d'âge archéen. Le modèle décrit a été réalisé à partir d'observations géologiques, de mesures géophysiques [29], et de nombreux tests par pompage réalisés sur une vingtaine d'ouvrages placés dans l'intrusif et dans l'encaissant granitique [23]. La Figure 16, extraite de la publication [23], présente ce modèle.

a) Structure géométrique de l'aquifère :

D'un point de vue géométrique, le profil d'altération est significativement plus épais au niveau de l'hétérogénéité : d'un facteur 1,5 à 3 pour l'épaisseur du niveau de saprolite et d'un facteur 3 à 5 pour celle de la zone fracturée. A proximité du contact, le profil dans le granite est toujours caractérisé par des niveaux de saprolite et de zone fracturée subparallèles entre eux. Cependant, ils ne sont plus subparallèles à la surface contemporaine de l'altération mais subparallèles aux épontes de la discontinuité (Figure 16). En conséquence, la structure géométrique du profil est caractérisée par une forme en « U ». La veine de quartz est principalement caractérisée par des fractures subparallèles et sub-orthogonales à la direction du filon (Figure 17).

Cette forme en « U » montre un enracinement local du profil d'altération qui résulte des mêmes processus d'altération que ceux observés sur les profils horizontaux et stratiformes. Les contraintes résultant du développement du profil dans le granite encaissant le filon de quartz, et principalement celui de l'horizon fracturé, induisent une fracturation du filon. Ceci explique notamment les nombreuses fractures métriques à décimétriques observées sur le filon. La présence de ces fractures induites par l'altération de l'encaissant favorise la circulation d'eau en profondeur le long des épontes du filon et au sein du filon lui-même. Ces circulations plus profondes permettent une altération en profondeur de l'encaissant et conduisent à un enracinement local du profil dans le granite le long de la zone de contact. Le champ de contraintes, lié au développement du profil et au gonflement des minéraux, se trouve alors modifié. Il en résulte que la contrainte la plus faible, d'ordinaire orthogonale à la paléo-surface devient subparallèle au filon conduisant au développement d'un horizon fracturé verticalisé et essentiellement dominé par un réseau de fractures verticales. Ainsi, durant l'altération de la formation granitique encaissante le filon devient perméable et favorise un approfondissement local du profil, d'extension latérale pluri-décimétrique dans l'exemple traité. Cet épaississement est à l'origine d'une augmentation locale de la zone transmissive de l'aquifère. De plus, le filon est lui-même soumis aux effets de l'altération induisant pour l'essentiel des fractures à petite échelle et la production de matériaux altérés (quartz saccharoïdal par exemple). L'altération de l'intrusif contribue donc à amplifier le processus d'approfondissement décrit ci-dessus.

b) Propriétés hydrodynamiques :

Les propriétés hydrodynamiques de l'horizon fracturé vertical jouxtant le filon sont très similaires à celles rencontrées dans la zone fracturée horizontale et stratiforme (Figure 16 ; Figure 18). La perméabilité est de l'ordre de 10^{-5} m/s, l'emmagasinement de 10^{-3} . Le fonctionnement hydrodynamique est caractérisé par un comportement de double porosité, K_m : 10^{-7} m/s, où l'écoulement est chenalisé en raison de la géométrie du filon (Figure 19). Cependant, contrairement à l'horizon fracturé subhorizontal, caractérisé par une anisotropie de perméabilité horizontale ($K_x/K_z=10$ et $K_x/K_y=1$), la zone fracturée verticale se démarque par la dominance du réseau de fractures sub-verticales et subparallèles au filon ($K_y>K_x$, $K_z>K_x$, l'axe y est parallèle au filon; Figure 16).

Le filon de quartz est typiquement caractérisé par un fonctionnement en double porosité (Figure 20), la perméabilité du réseau de fractures est l'ordre de 4 à 6×10^{-4} m/s, son emmagasinement de l'ordre de 3 à 5×10^{-4} et provient en grande partie des blocs peu perméables (K_m : 2×10^{-9} m/s ; Figure 16). Cependant, au sein du filon ces propriétés hydrodynamiques sont très variables et dépendent en premier ordre du degré d'altération-fracturation de la roche : peu fracturé et peu perméable au cœur (K : 10^{-7} m/s), alors que fortement fracturé et perméable aux épontes (K : 5×10^{-6} m/s). L'aquifère au sein du filon est par ailleurs caractérisé par une anisotropie de perméabilité dans le plan vertical (K_x/K_z : 3) qui est interprétée comme la conséquence d'une diminution de la densité de fracture avec la profondeur. Comme pour la zone fracturée verticale

du granite, le filon est caractérisé par un réseau de fractures sub-verticales dominant conduisant à une anisotropie de perméabilité dans le plan horizontal ($K_y > K_x$; K_y/K_x : 3.0).

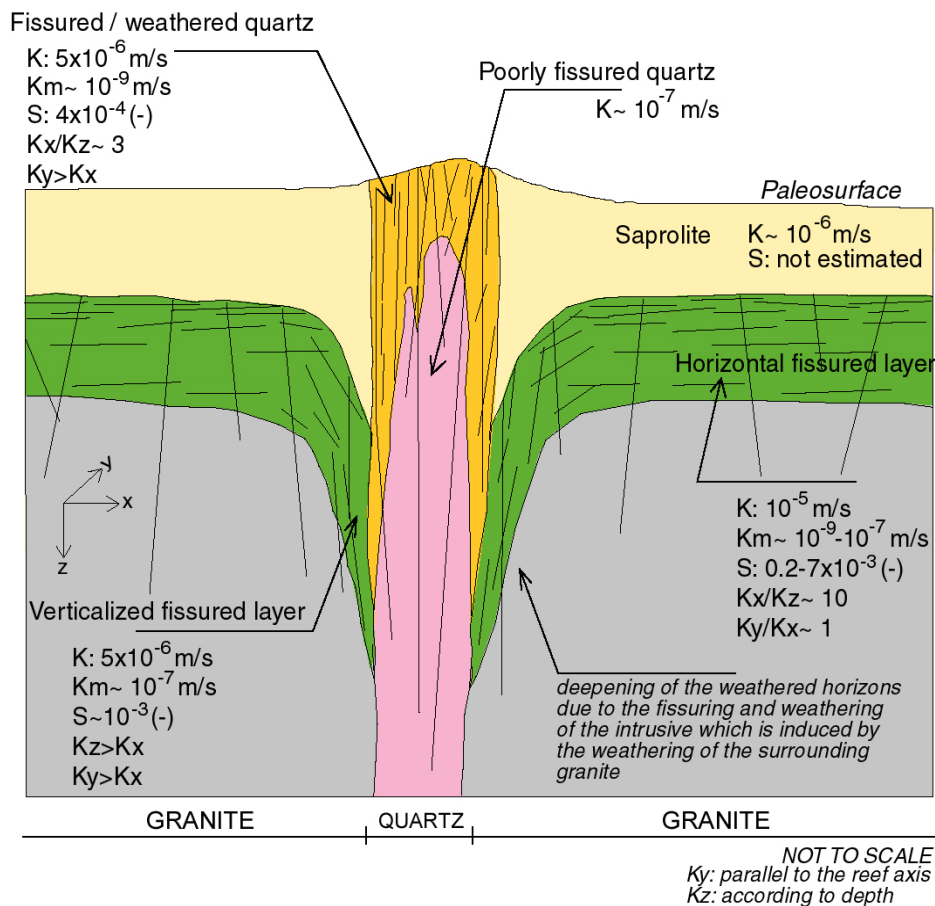


Figure 16 : modèle hydrodynamique conceptuel d'un aquifère de socle en présence d'une discontinuité géologique : exemple d'un filon de quartz au sein d'un granite, Inde (tiré de [23]).

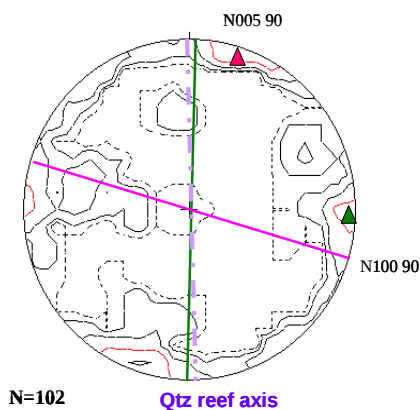


Figure 17 : diagramme de densité représentant la distribution des pôles des fractures sur la veine de quartz (Inde ; tiré de [23]). Projection dans l'hémisphère inférieure.

Les triangles et les lignes matérialisent les principaux réseaux de fractures. La ligne en pointillés, d'orientation nord-sud, représente la veine de quartz.

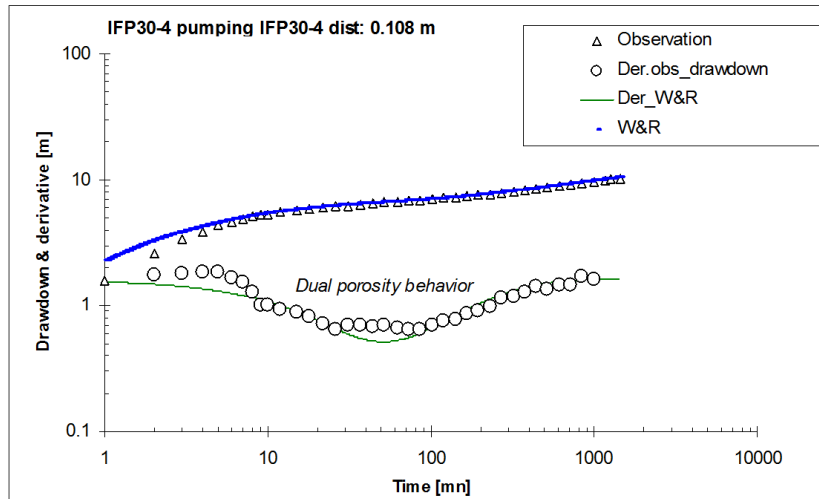


Figure 18 : pompage dans la zone fracturée horizontale stratiforme du granite (Inde) ; forage situé à environ 60 mètres du filon de quartz. Mise en évidence du comportement double porosité de la formation. Modèle : Double porosité (Warren & Root [W&R]). Der. : dérivée (observation et modèle).

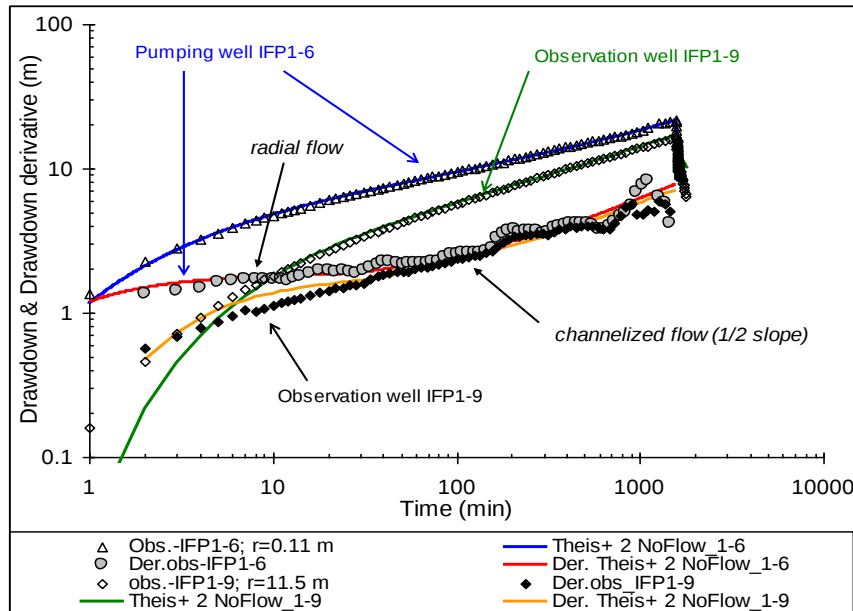


Figure 19 : pompage dans l'horizon vertical du granite à proximité d'un filon de quartz décamétrique (Inde). Mise en évidence de la structure bidimensionnelle de l'aquifère due à la forme en « U » du profil d'altération (tiré de [23]). Der. : dérivée (observations et modèles).

Observations au puits de pompage (IFP1-6) et sur un piézomètre d'observation (IFP1-9 ; distance :11,5 m).

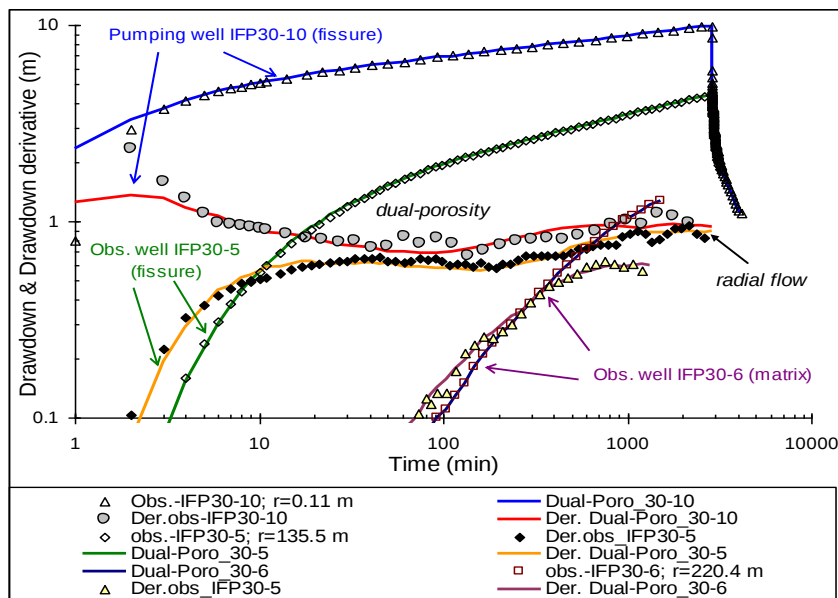


Figure 20 : pompage dans un filon décimétrique de quartz (Inde ; tiré de [23]). Mise en évidence du comportement double porosité de la formation. Modèle : double porosité (WTFM de Lods et Gouze, 2004).

Observations au puits de pompage et sur deux piézomètres d'observation, un dans le réseau de fractures et l'autre dans la matrice.

D'autres discontinuités géologiques telles que les failles, les filons leucocratiques, les pegmatites ou les zones de contact entre différentes formations géologiques, peuvent aussi constituer des structures drainantes locales là où le profil d'altération s'est enraciné en profondeur. Les propriétés hydrodynamiques de ces zones sont en général accrues, en particulier la transmissivité, du fait d'une augmentation importante de l'épaisseur aquifère. En conséquence, ces zones sont des cibles hydrogéologiques de choix.

Si ce phénomène d'approfondissement du profil d'altération est observé pour des discontinuités géologiques produisant des matériaux relativement perméables comme les filons de quartz et autres formations susmentionnées, celles ne produisant que des matériaux argileux et imperméables, comme les filons de dolérite –argilisation dans la masse sans réel gain de volume et donc sans importante fracturation, ne favorisent ni le développement d'un profil ni les propriétés hydrodynamiques (Perrin et al., 2011). Ces filons sont, de prime abord, de mauvaises cibles hydrogéologiques.

D'autres de mes travaux ont permis d'élaborer des schémas de fonctionnement hydrogéologique au niveau de structures singulières, ou de contextes géologiques plus complexes. Roques et al. [16, 17] décrivent, à partir de données de suivis hydrodynamiques et géochimiques en écoulement naturel et lors d'un pompage de longue durée (9 semaines) dans les schistes briovériens de Bretagne, non loin de Rennes, le fonctionnement d'une zone de faille profonde. Le schéma est très similaire au précédent. Lors du pompage, les suivis ont mis en évidence des eaux d'origines différentes dont la contribution varie au cours du temps : d'abord des eaux profondes et anciennes venant de la zone de faille, puis des eaux d'âge moyen provenant de la zone fracturée bordant la faille, et en fin d'essai des eaux superficielles et récentes provenant de l'horizon fracturé – altéré de surface. Les travaux pluridisciplinaires menés sur des gisements d'eaux minérales carbo-gazeuses ont permis de proposer d'autres schémas de fonctionnement pour des systèmes plus particuliers. Dans la série des paragneiss de la Montagne Noire au niveau de La Salvetat-sur-Agout (Hérault) [20], la structure des aquifères est en première approximation

issue d'un profil d'altération supergène (Crétacé moyen) probablement en grande partie tronqué. A l'échelle régionale, l'épaisseur de saprolite est d'une dizaine de mètres, suivie par environ 30 à 40 m de zone fracturée. Cependant, au niveau des faciès les plus carbonatés (gneiss de Nages), les profils d'altération peuvent s'enraciner à plus de 150 m de profondeur, vraisemblablement à cause de l'altération locale hydrothermale engendrée par les remontées de CO₂ mantellique. Ainsi à l'échelle du gisement d'eaux minérales de La Salvetat, la combinaison de ces processus d'altération confère à l'aquifère une géométrie de type « tôle ondulée », alternant zones profondes, sièges actuels ou anciens de remontée de CO₂ dans des faciès carbonatés, et zones peu profondes soit à cause de faciès moins ou peu carbonatés et/ou l'absence de remontée de CO₂. Un autre exemple, en contexte de marches de socle en bordure de Limagne à Saint Galmier (Loire) [4], a montré l'existence d'un ancien profil d'altération polyphasé dont la première phase aurait démarré au Crétacé, enfoui sous une épaisse couche de sédiments du Miocène-Oligocène. L'épisode de rifting et la mise en place du graben ont compartimenté le profil, donnant au profil et à l'aquifère qui y est associé sa structure en touche de piano. Cependant, dans ce cas, il a été montré que les failles tectoniques qui structurent le gisement des eaux minérales (Badoit) en parallélépipèdes de quelques kilomètres carrés sont argilisées et peu perméables.

La structure complexe fracturée, mise en évidence par ces différents modèles conceptuels, m'a conduit à réfléchir sur l'interprétation des essais de pompage, sur les modèles à utiliser, et notamment sur les propriétés et les informations structurales des aquifères qui pouvaient en être déduites.

2.2. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DES AQUIFERES PAR L'INTERPRETATION ET LA MODELISATION DES ESSAIS PAR POMPAGE

L'objectif de cette caractérisation est d'avoir une vision aussi claire que possible de la structure géométrique et des propriétés hydrodynamiques du ou des aquifères qui font l'objet d'essais par pompage. Ces informations hydrodynamiques déduites seront ensuite mises en perspective avec l'information géologique disponible (logs géologiques des ouvrages, cartes, etc.), ce qui permettra d'améliorer les modèles conceptuels de fonctionnement et la compréhension des relations entre les propriétés hydrodynamiques et la géologie ainsi que les géométries des aquifères. Le cas échéant, ces informations serviront à alimenter en paramètres les modèles numériques.

2.2.1. Généralités, rappel sur le diagnostic des essais

L'interprétation des essais de pompage dans les formations fracturées, comme celles des aquifères de socle, ou dans les formations sédimentaires hétérogènes est souvent complexe. C'est la conséquence de la géométrie des réseaux de fractures, des relations fracture-matrice, de la connexion de ces réseaux avec des aquifères de surface, ou de l'empilement et de la géométrie de séries à perméabilités différentes lorsqu'il s'agit de formations sédimentaires.

Afin de déterminer les différentes composantes d'écoulement associées aux propriétés hydrauliques de tels aquifères, il est nécessaire de porter une attention particulière aux essais de pompage et de poser un diagnostic aussi fin que possible sur les essais avant toute modélisation. Le diagnostic repose sur l'interprétation des pentes de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements ($\partial s / \partial \ln t$; à la descente ou à la remontée des niveaux) qui a l'avantage de représenter tous les régimes d'écoulement sur un seul et même graphique bi-logarithmique (Bourdet et al., 1983, 1989 ; Spane et Wurstner, 1993 ; Ramos et al., 2017 ; [26], etc.). L'avantage de cette méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère mais aussi pour chaque type de configuration forage-aquifère (captage partiel de l'aquifère par exemple), il correspond

un certain régime ou une succession de régimes d'écoulement qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Deruyck et al., 1992 ; Jourde et al., 2002 ; Schlumberger, 2002 ; Renard et al., 2009 ; Rafini et Laroque, 2012 ; Ferroud et al., 2018). Par exemple, un écoulement radial sera caractérisé par une dérivée formant un plateau (pente nulle), l'atteinte de deux limites étanches parallèles par une pente de 1/2, 4 limites étanches orthogonales (ou un autre type de réservoir fermé) par une pente de 1, un captage partiel de l'aquifère par une pente de -1/2, un effet de drainance par une pente négative infinie, etc. La Figure 21 présente comme exemple les différents types d'écoulement que l'on observe lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire où, au fur et à mesure, les limites étanches (orthogonales entre elles) sont perçues par l'essai. L'effet capacitif du puits est aussi pris en compte.

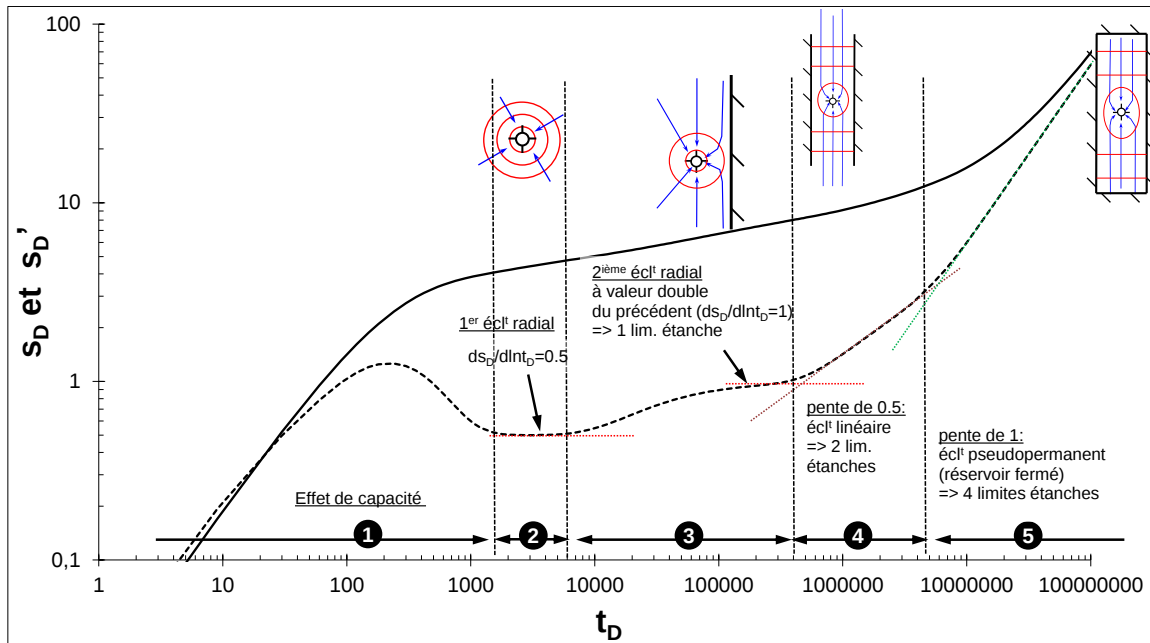


Figure 21: exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos ; modèle développé par l'auteur.

t_D : temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s'_D (courbe tirée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit (Bourdette et al., 1983), le bruit étant engendré par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de l'outil de mesure des niveaux d'eau (sonde manuelle, sonde automatique). Il est important de rappeler que ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles.

De plus, lorsque le débit varie de façon significative durant l'essai, il est nécessaire de prendre en compte ces variations dans le calcul. Le calcul de la dérivée est donc réalisé à partir des rabattements spécifiques (normalisation par rapport aux variations de débit) et du temps de superposition (fonction aussi des variations de débit). On obtient ainsi une courbe type de l'essai –c'est-à-dire pour un débit unitaire- qui est dérivée et interprétée suivant la méthode précédemment décrite.

Une fois la courbe des dérivées construite, le diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement et à en déduire les propriétés du forage (effet de capacité, effet de skin,...), de l'aquifère (isotrope, anisotrope, fracture verticale, double porosité, etc.), de sa géométrie (effets de limites), des éventuelles relations entre l'aquifère capté et d'autres aquifères (effet de

drainance par exemple) et éventuellement la mise en évidence d'écoulements fractionnaires comme par exemple ceux dus à la forte perméabilité d'un drain karstique. Enfin, une fois le diagnostic posé, l'estimation des paramètres de l'aquifère est réalisée à partir du modèle mathématique le plus approprié. Puis, le modèle conceptuel de l'aquifère est validé en jugeant de la pertinence de la modélisation et des informations géologiques disponibles sur la formation testée. Les Figure 18 à Figure 20 montrent des exemples de traitement de données d'essais par pompage suivant cette méthodologie (voir aussi [23]).

2.2.2. Les modèles que j'ai développés pour les milieux fracturés.

L'avantage de cette méthode de diagnostic est qu'elle permet une interprétation très fine de l'essai par pompage. Elle conduit à l'élaboration d'un schéma conceptuel de fonctionnement de l'aquifère qu'il convient de prendre en compte de la façon la plus précise possible avec les modèles mathématiques dont on dispose. Cependant, il arrive que le schéma identifié ne soit pas décrit par les modèles existants dans la littérature, ce qui nécessite le développement de nouveaux modèles.

a) Aquifère en « T », modèle compartimenté verticalement

Ce modèle est issu d'un de mes travaux relativement récents [13*]. Il considère un puits implanté dans un compartiment central de transmissivité T_1 , d'emmagasinement S_1 et de largeur $2L$, limité dans l'espace par deux compartiments de transmissivités et d'emmagasinement différents (T_2 , S_2 et T_3 , S_3). L'épaisseur des compartiments peut être différente et le compartiment central peut être anisotrope. La Figure 22 présente cette configuration et ses paramètres hydrodynamiques. Cette solution est adaptée au schéma décrit sur la Figure 16, ou de façon plus générale au cas d'une zone de fractures recoupant des aquifères de surface, ou d'un filon traversant des formations de socle, soit des cibles hydrogéologiques de choix pour l'emplacement de forages dans les aquifères cristallins (Sander, 2007 ; [7, 23]). Le modèle décrit fait suite aux travaux de Butler et Lui (1991) dans lequel l'anisotropie de perméabilité de la partie centrale et la présence de compartiments aux épaisseurs différentes ont été introduites. Les solutions proposées pour résoudre l'évolution du rabattement dans les trois compartiments sont fondées sur une application non conventionnelle de la théorie des puits images à l'origine proposée par Fenske (1984) pour le cas de deux compartiments seulement et, redéveloppée ici pour le cas décrit, soit trois compartiments. Le modèle intègre aussi les effets liés au puits (capacité de puits, skin et pertes de charge quadratiques).

La Figure 23 montre un exemple d'application dans le cas d'une zone de faille dans les schistes briovériens de Bretagne (St Brice en Coglès), pour lequel le flux de drainance des compartiments latéraux a été calculé et comparé à l'information géochimique.

Bien que publiée pour le cas où le puits de pompage capte complètement l'aquifère, la solution a aussi été développée pour le cas où le puits ne capte que partiellement l'aquifère et pour la prise en compte d'une anisotropie 3-D de perméabilité dans le compartiment central (Figure 24). Cette solution n'est pas encore publiée. Ces solutions sont aussi applicables en milieux sédimentaires pour le cas, par exemple, d'un aquifère central séparé par deux aquifères adjacents d'épaisseurs uniformes ou non.

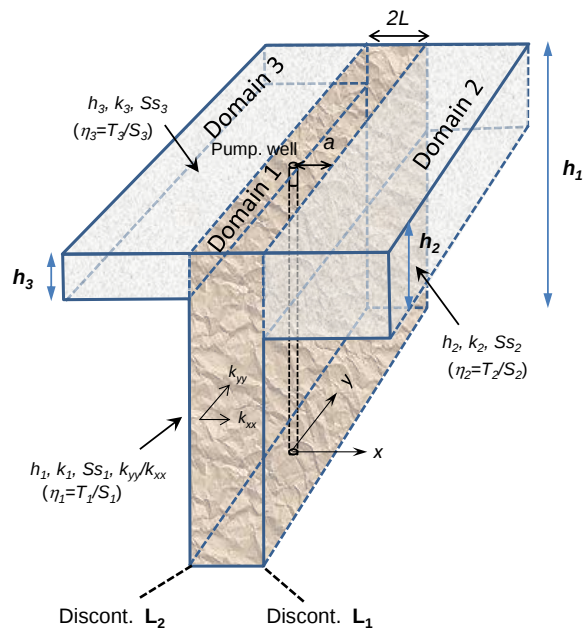


Figure 22 : aquifère compartimenté en « T » avec anisotropie de perméabilité dans le compartiment central (tiré de [13*]).

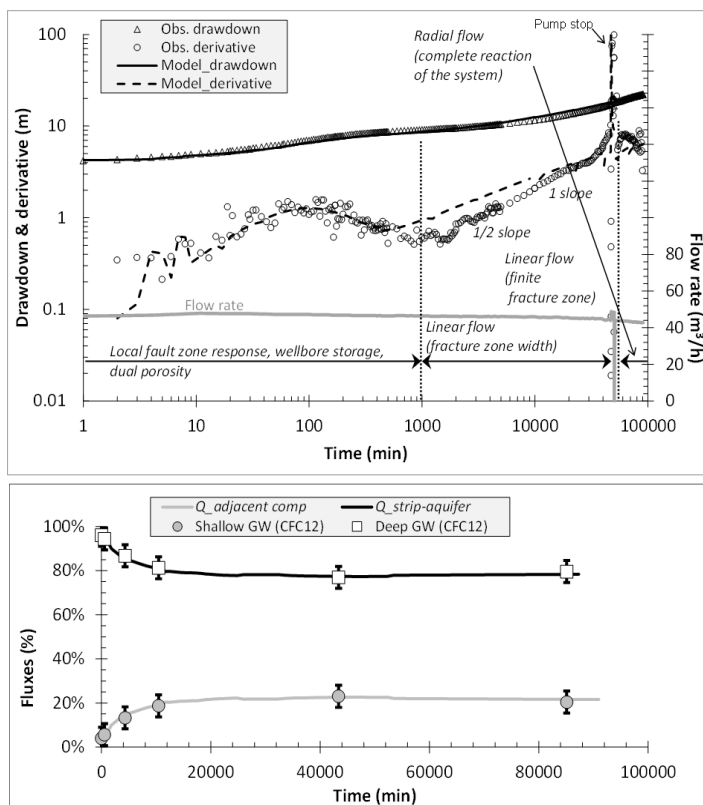


Figure 23 : application du modèle en « T » au pompage de longue durée (9 semaines) dans la zone de failles du site de St Brice en Coglès (35), schistes (tiré de [13*]).

Graphe du haut : rabattements et dérivées observées et modélisées. Graphe du bas, contribution des flux venant de la zone de fractures et des aquifères latéraux, et comparaison aux contributions déduites de la datation des eaux souterraines (CFC12; [16]).

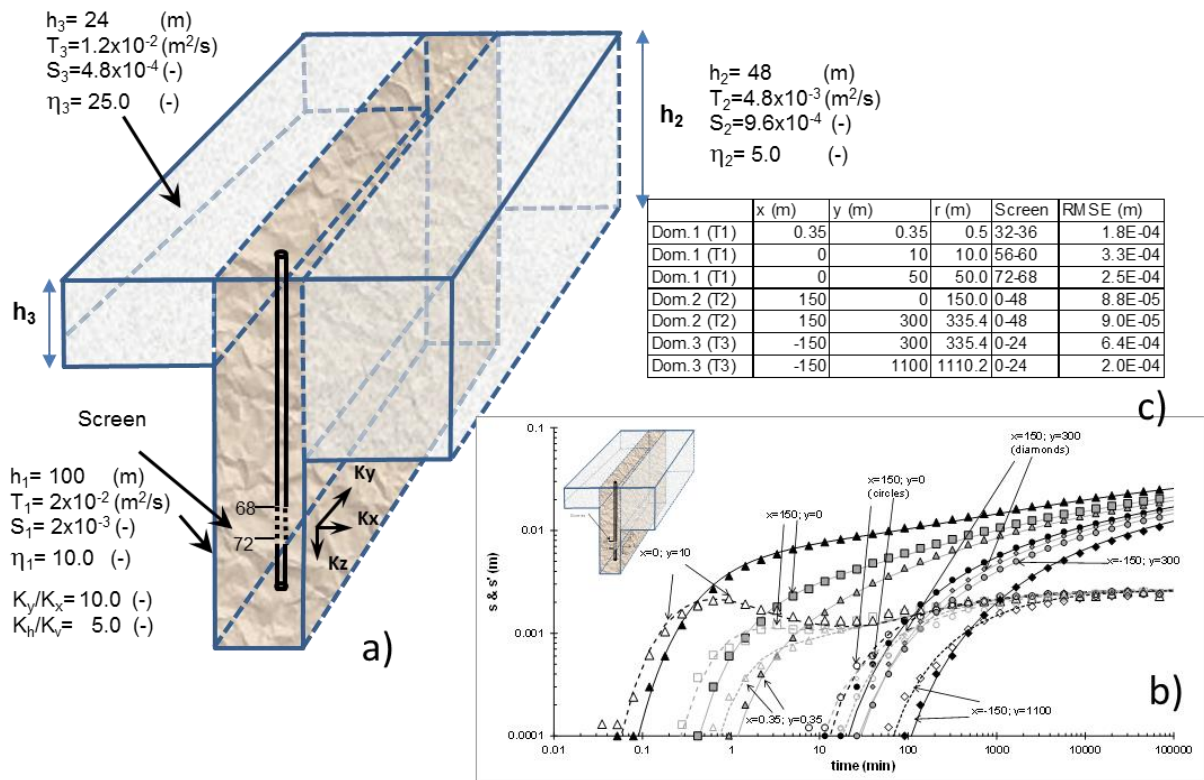


Figure 24 : aquifère compartimenté en « T » avec anisotropie 3-D de perméabilité dans le compartiment central et captage partiel de l'ouvrage ; modèle non publié.

a) schéma et propriétés des aquifères, b) calcul du rabattement en différents points de l'aquifère et comparaison à un modèle numérique (modèle MARTHE-BRGM), c) coordonnées des piézomètres, hauteur crépinée du piézomètre (screen) et RMSE (Residual Mean Square Error) entre la solution analytique et le modèle numérique.

b) Généralisation d'une solution permettant de modéliser le pompage dans une ou des fractures, quel que soit le type d'aquifère

Le comportement de l'écoulement transitoire dû au pompage dans les roches fracturées est étudié depuis plus de 80 ans. Plusieurs solutions analytiques ont été proposées pour résoudre le problème d'un puits interceptant et pompant une fracture verticale, horizontale ou inclinée dans des aquifères homogènes, mais leur domaine d'application -même en couvrant différentes géométries de fractures, est limité aux aquifères isotropes ou anisotropes et au cas où les limites potentielles de l'aquifère doivent être parallèles ou orthogonales à la direction de la fracture (Gringarten et Ramey, 1973, 1974 ; Gringarten et al., 1974 ; Cinco-Ley et al., 1975, 1998 ; Thiery, 1980; voir aussi le site web de Petrowiki). La question reste ainsi non résolue pour de nombreux cas naturels. Par exemple, le cas d'un puits qui intercepte et pompe une fracture dans un aquifère multicouche ou un aquifère à double porosité, le cas de fractures non nécessairement parallèles ou orthogonales aux limites de l'aquifère, le cas d'un puits interceptant des fractures de géométrie et d'orientation différentes, le cas où l'eau pompée provient à la fois de la fracture mais aussi de l'intervalle crépiné du puits, etc. Ce constat m'a motivé à développer une solution générique [1*].

Il est mathématiquement démontré dans [1*] que l'intégration de la solution analytique bien connue de Theis² (Theis, 1935) le long de l'axe de la fracture est identique à la solution analytique, aussi bien connue, de Gringarten et al. (1974)³ pour un pompage dans une fracture à flux uniforme recoupant complètement un aquifère homogène. L'hypothèse de flux uniforme dans la fracture correspond à la meilleure approximation pour une fracture à perméabilité infinie. Cette démonstration implique que toute solution existante de type « ligne » (« line source ») ou de type source ponctuelle (« point source ») peut être utilisée, par intégration le long d'une ligne ou dans un plan, pour modéliser le pompage d'une ou plusieurs fractures interceptées par le puits. Cette théorie s'offre ainsi à un large panel de solutions mathématiques, et donc à la possibilité de traiter un grand nombre de cas naturels. Dans la publication [1*], plusieurs exemples théoriques sont présentés et discutés :

- une fracture verticale dans un aquifère à double porosité,
- une fracture interceptant partiellement un aquifère multi-couches (Figure 25),
- deux fractures inclinées dans un aquifère multi-couches où seules les fractures sont pompées,
- et l'aquifère multi-couches où à la fois les deux fractures inclinées et l'intervalle crépiné du puits sont pompés (Figure 26, Figure 27).

Pour les deux derniers cas traités, la publication présente les solutions mathématiques permettant de calculer les flux en provenance des diverses sources de pompage (fractures, intervalle crépiné), et les solutions de rabattement afférentes.

Ainsi cette solution générique permet à partir de n'importe quelle solution mathématique existante, ou à venir, de traiter le cas d'un puits interceptant une ou plusieurs fractures discrètes, où l'on peut pomper à travers les fractures mais aussi le puits lui-même. Car basée sur le principe de superposition -c'est-à-dire que la fracture, ou le puits, est divisée en une infinité de sources minuscules, cette technique permet de prendre en compte des fractures non nécessairement parallèles ou orthogonales aux limites de l'aquifère, et, dans le cas de champs captants, de prendre en compte des puits interceptant des fractures de géométrie et d'orientations différentes, ou même qui n'en n'ont pas interceptées. Par ailleurs, même si les solutions ont été définies ici pour des fractures planaires, d'autres géométries, quelconques, peuvent être prises en compte.

Ce travail fait aussi l'objet d'un dépôt de brevet (cf.§1.10.5).

Le modèle proposé peut être applicable à n'importe quelles formations fracturées, y compris les aquifères de socle, et même aux formations où existent des niveaux très perméables (c.à.d. leur perméabilité peut être considérée comme infinie par rapport à la perméabilité du reste de l'aquifère), comme un niveau scoriacé très perméable intercalé entre deux coulées de basalte beaucoup moins perméables.

² La solution de Theis décrit l'évolution du rabattement induit par un pompage dans un puits (c.à.d. pompage sur une ligne) dans un aquifère homogène.

³ La solution de Gringarten décrit l'évolution du rabattement induit par un pompage dans une fracture interceptée par le puits (c.à.d. pompage dans un plan) dans un aquifère homogène.

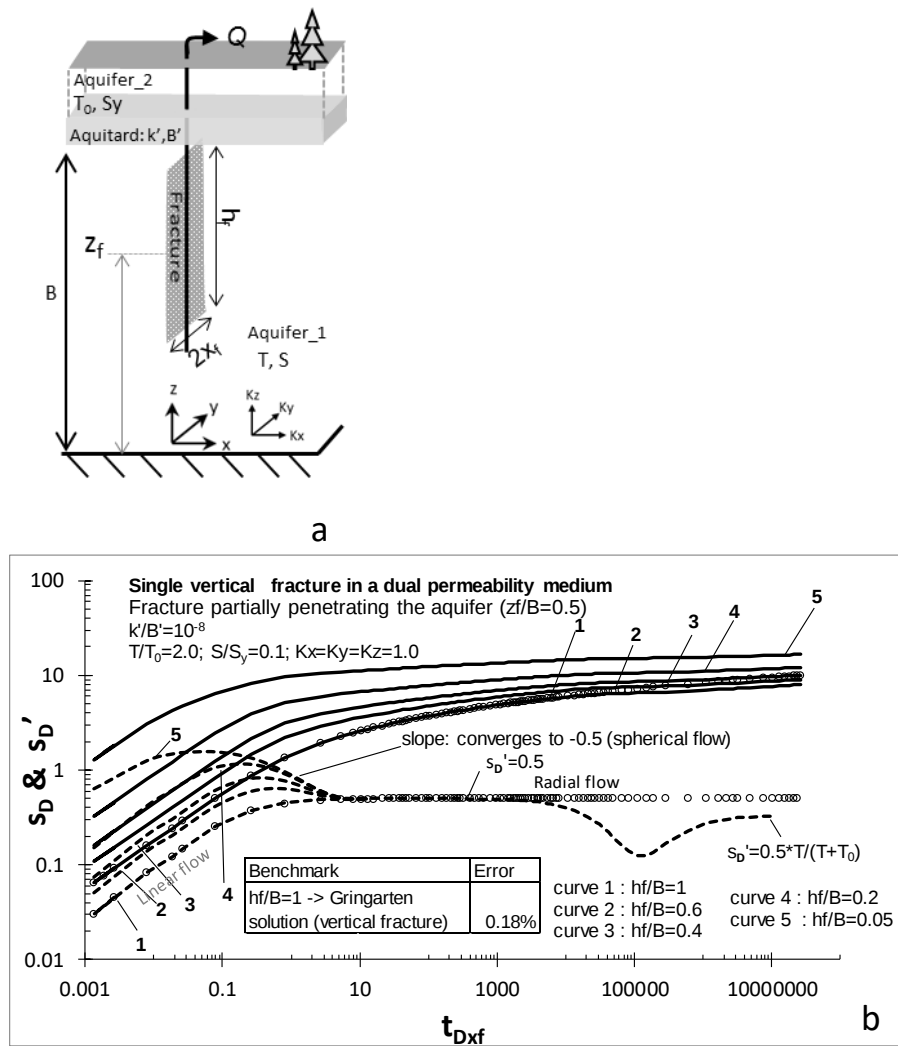


Figure 25 : une seule fracture verticale incisant partiellement un aquifère multicouche (tiré de [1*]).

Fracture dans l'aquifère profond et pompage au centre de la fracture. a) modèle conceptuel avec paramètres de l'aquifère. b) courbes types pour divers degrés d'incision de la fracture dans l'aquifère profond (h_f/B). Les cercles correspondent à la solution analytique de Gringarten et al. (1974).

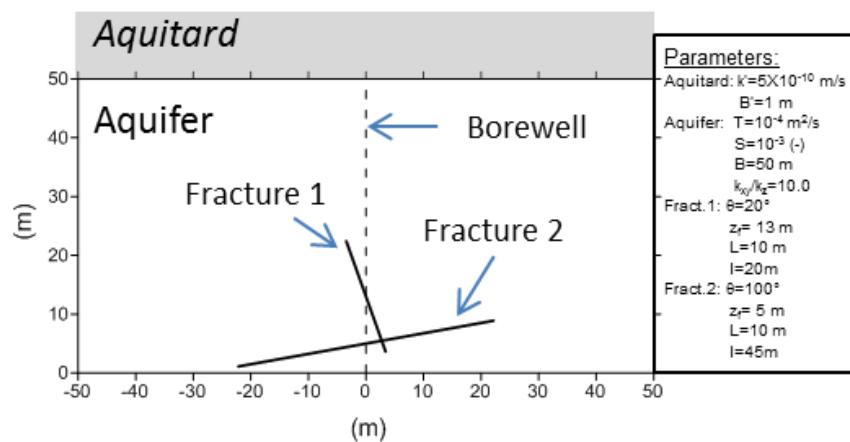


Figure 26 : deux fractures inclinées dans un aquifère soumis à effet de drainage : paramètres du modèle (tiré de [1*]).

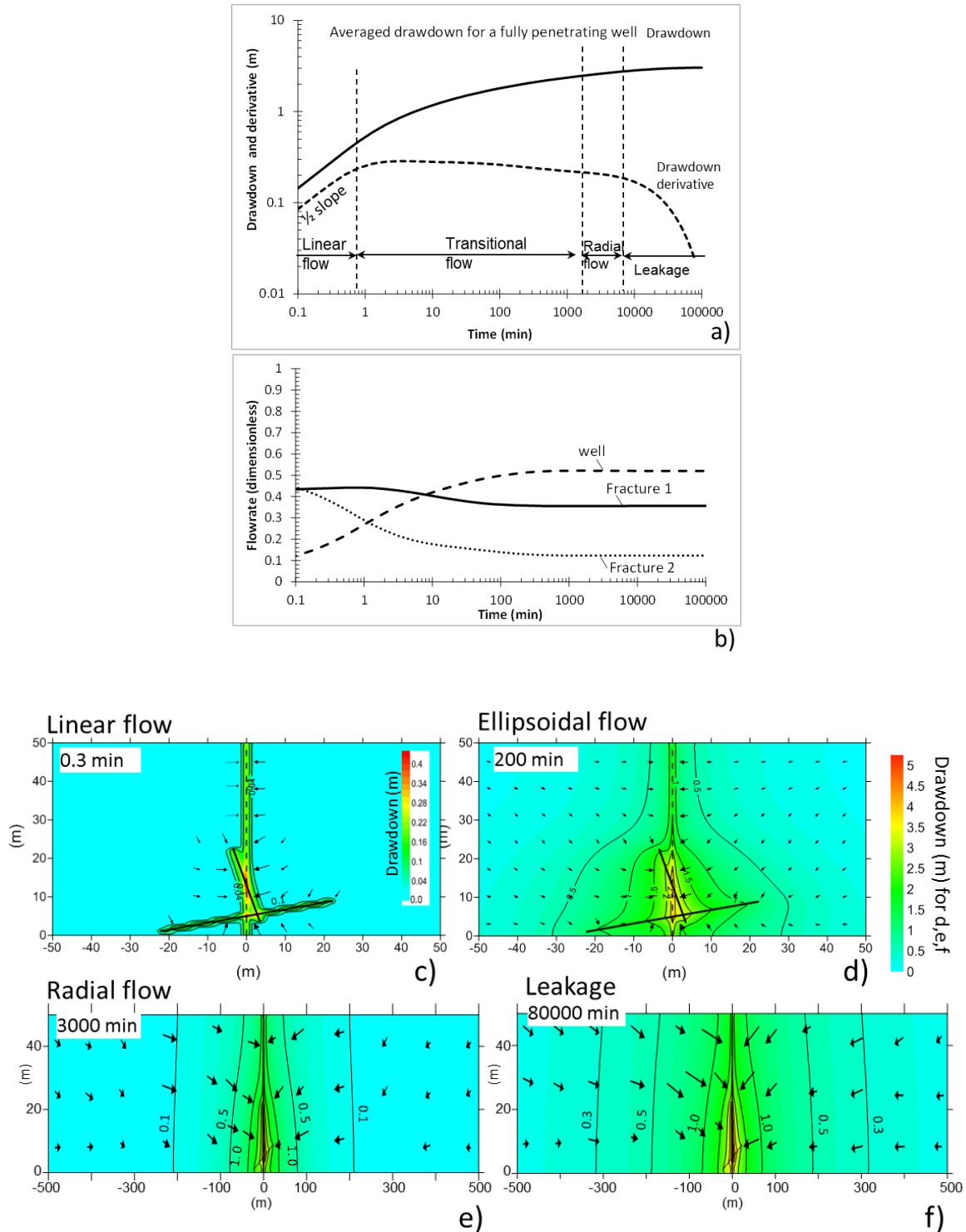


Figure 27 : deux fractures inclinées dans un aquifère soumis à effet de drainance, pompage dans les fractures et dans l'intervalle crépiné du puits (ici sur toute la hauteur de l'aquifère) ; voir la figure précédente pour les paramètres du modèle (tiré de [1*]).

a) évolution du rabattement au niveau du puits et sa dérivée, b) évolution de la contribution en terme de débit (sans dimension) de chaque fracture et du puits, c), d), e) et f) distribution du rabattement à divers moments du pompage, vue dans le plan x, z.

2.2.3. Autres modèles

Du fait de mon activité soutenue en interprétation et modélisation des essais par pompage, mais aussi à cause du besoin de répondre régulièrement à des cas non traités par les solutions mathématiques existantes, j'ai confectionné une bibliothèque de solutions analytiques, dont certaines sont inédites. Voici des exemples :

- aquifère multi-couches, cas d'un puits qui capte les deux horizons perméables ; forage vertical (Figure 28a). Cette solution est une adaptation des travaux de Hunt et Scott (2007), avec prise en compte de l'évolution du débit des deux niveaux. Le calcul du rabattement est disponible dans les deux niveaux, ainsi que celui du flux de drainance ;
- aquifère multi-couches, cas d'un puits captant partiellement ou pas l'aquifère inférieur. L'aquifère peut être limité par une à quatre limites étanches orthogonales et peut avoir une anisotropie 3D de perméabilité ; le forage est vertical (Figure 28b). Cette solution est une adaptation des travaux de Hantush (1961) et Hunt et Scott (2007). Le calcul du rabattement est disponible dans les deux niveaux, ainsi que celui du flux de drainance ;
- aquifère avec drainance d'un aquitard supérieur, avec anisotropie de perméabilité 3-D et jusqu'à quatre limites étanches orthogonales ; le forage est incliné (Figure 28c). Cette solution est une adaptation des travaux de Hunt (2005). Le calcul fournit le rabattement dans l'aquifère ainsi que le flux de drainance ;
- aquifère avec drainance d'un aquitard supérieur et cours d'eau incisant partiellement l'aquitard de surface, jusqu'à quatre limites étanches orthogonales ; forage vertical complet (Figure 28d). Cette solution a été obtenue en appliquant le principe de superposition (méthode des images) sur la solution de Hunt (2008). Le calcul du rabattement est disponible dans les deux niveaux, ainsi que celui du flux de drainance, et du flux en provenance du cours d'eau ;
- les modèles du type « au milieu coule une rivière », où j'ai repris et établi vingt solutions analytiques pour des configurations géologiques et de géométrie du cours d'eau différentes, dont certaines sont inédites (par ex. Figure 28d et e). Pour toutes ces solutions, il est possible de faire un calcul de l'impact d'un pompage dans un aquifère sur un cours d'eau (voir Rapport BRGM-ONEMA RP-67566-FR).

J'ai aussi développé des modèles à double porosité avec ou sans fracture, avec ou sans limite (Moench, 1984), certains à failles sécantes, d'autres où le puits est situé dans un aquifère à proximité d'une faille perméable (ou semi-perméable), avec une généralisation des effets de puits à toutes les solutions (capacité, skin, pertes de charge ; voir Balsingame, 1991), etc.

L'ensemble de ces solutions est régulièrement utilisé dans le cadre de projets de recherche, d'actions de service public ou d'expertises. La Figure 29 et la Figure 30 montrent deux exemples de ces applications. La première, réalisée à l'aide de la solution décrite à la Figure 28b, présente un pompage de 3 mois sur d'anciens puits de mine, les puits de l'Arc, situé à proximité d'Aix-en-Provence qui captent les formations karstifiées du Crétacé (Fuvélien). Dans ce cas, il était question d'évaluer la géométrie de l'aquifère et ses propriétés afin, entre autres, d'évaluer leur potentiel d'exploitation. Le deuxième exemple présente un pompage de longue durée (environ 50 jours) dans les schistes fracturés du Briovérien en Bretagne, où en plus d'évaluer la structure de l'aquifère, une des questions était de calculer l'impact du pompage sur un cours d'eau situé à proximité de l'ouvrage (modélisation réalisée à l'aide de la solution décrite à la Figure 28e).

Par ailleurs, toutes ces solutions étant superposables, elles permettent régulièrement de traiter le cas de pompages au niveau de champs captants complexes (Projet Aff-en cours dans le socle breton, RP-65200-FR dans un système karstique du Var, RP-61834-FR basaltes de la Réunion).

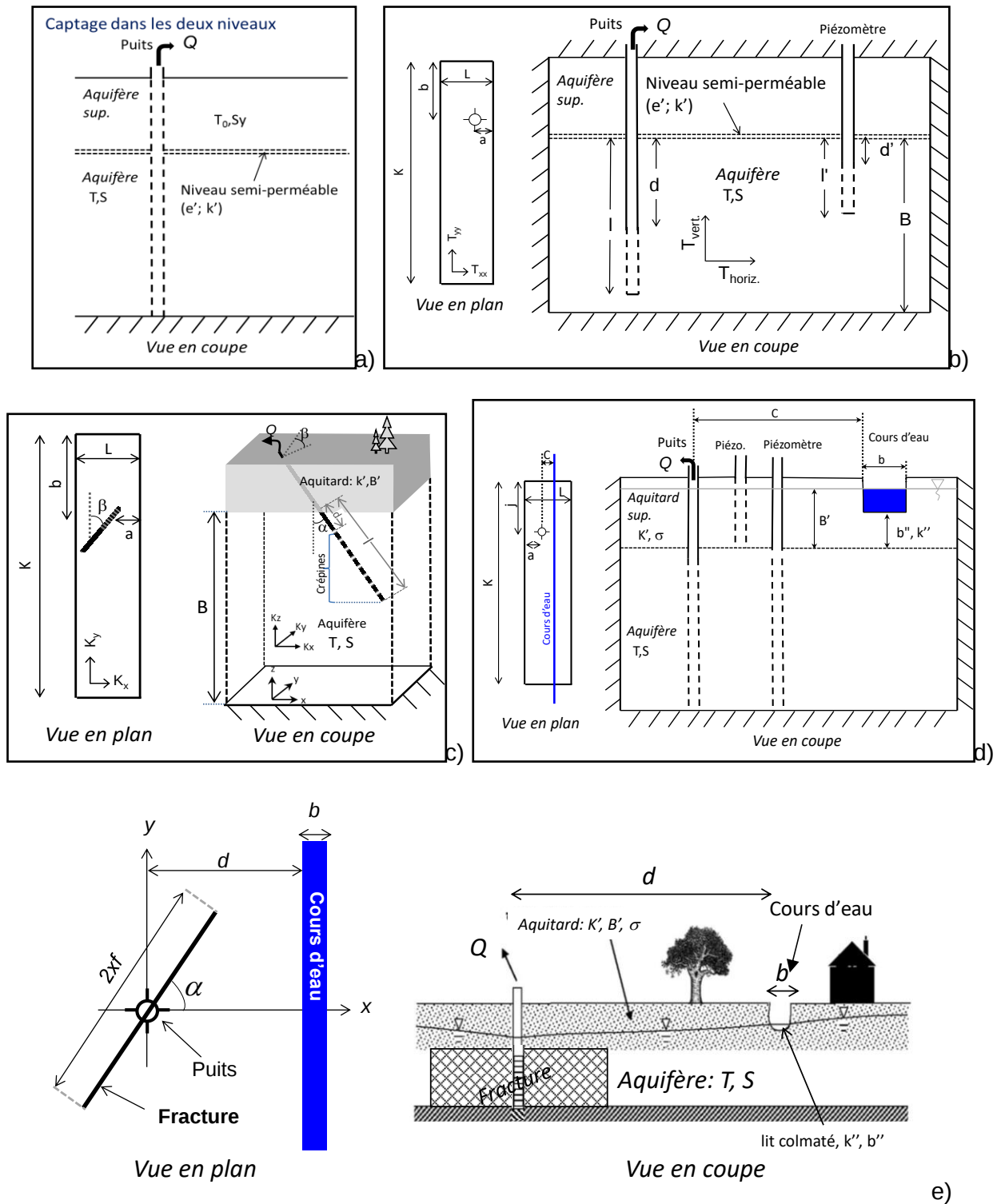


Figure 28 : exemples de modèles développés. Aquifères multi-couches : a) le puits capte les deux niveaux aquifères, b) aquifère rectangulaire, captage partiel de l'ouvrage, anisotropie de perméabilité 3D, c) aquifère rectangulaire avec drainance et forage incliné, d) aquifère rectangulaire avec drainance et cours d'eau, e) le puits capte une fracture verticale, drainance et cours d'eau.

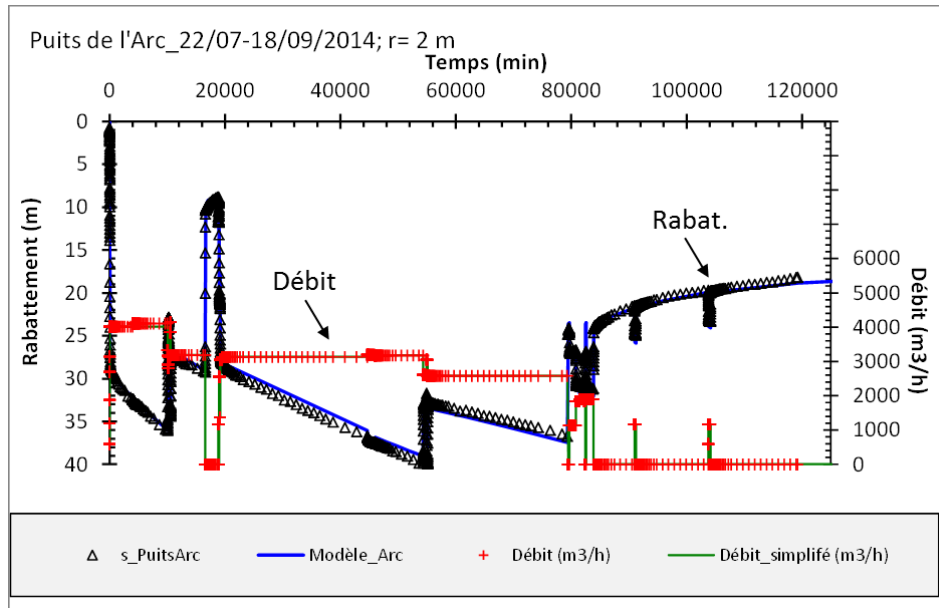
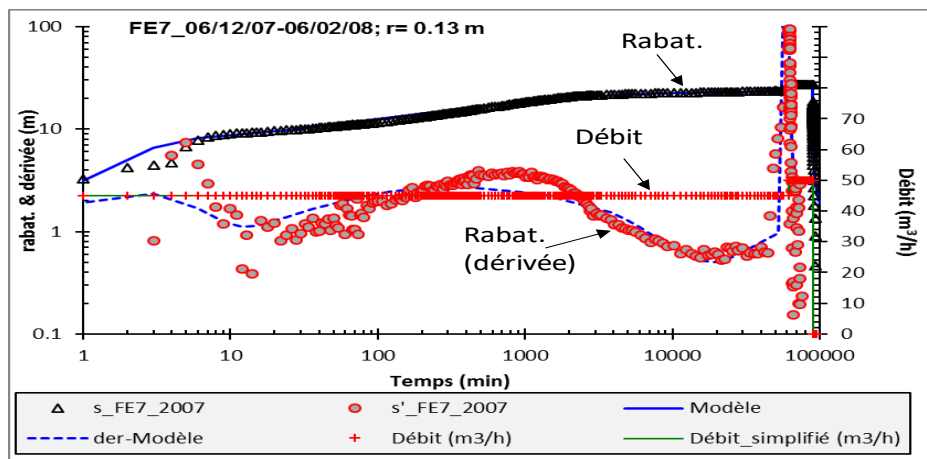
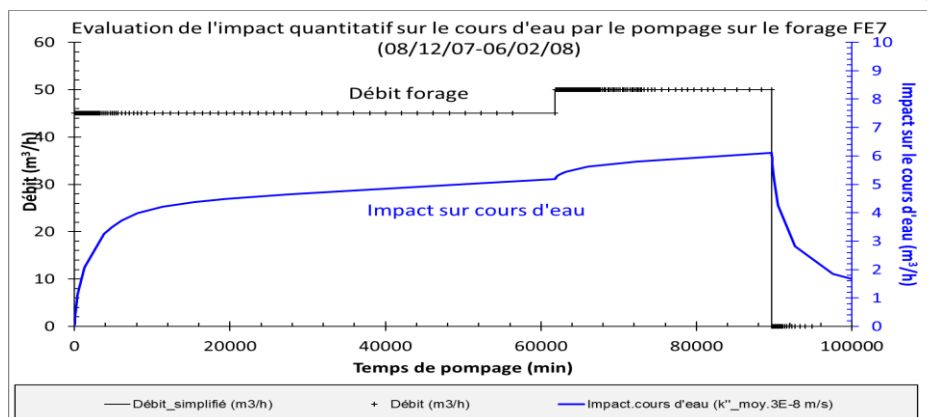


Figure 29 : modélisation de l'essai du 22/07 au 18/09/2014 aux puits de l'Arc (Crétacé karstifié ; Rousset, Bouche-du-Rhône). Modèle : Figure 28b. Réalisé dans le cadre du projet ARK.



a)



b)

Figure 30 : modélisation de l'essai du 08/12/07 au 06/02/2008 au forage FE7 (schistes du Briovérien-Bretagne). Modèle : Figure 28e. Réalisé dans le cadre du projet AFF (Bretagne).

2.3. METHODES POUR SPATIALISER LES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DANS LES AQUIFERES DE SOCLE

Bien qu'il soit relativement facile d'évaluer les propriétés hydrodynamiques d'un aquifère à l'échelle locale, en utilisant par exemple des tests hydrauliques comme précédemment décrit, il est par contre beaucoup plus difficile d'obtenir ces informations à l'échelle de l'aquifère où une même entité peut présenter une grande variabilité spatiale de ces propriétés. Ces informations doivent être absolument connues pour assurer une gestion globale de la ressource en eau (évaluation du stock d'eau disponible, capacité de recharge, réponse à des problématiques de contamination...) et constituent des éléments clés pour la mise en place de futurs captages et la modélisation numérique des systèmes aquifères.

Dans les aquifères de socle les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, emmagasinement) peuvent varier sur plusieurs ordres de grandeur, jusqu'à 12 pour la perméabilité par exemple (Tsang et al., 1996 ; Hsieh, 1998). Le problème n'est donc pas seulement d'avoir une estimation de ces paramètres à l'échelle de l'aquifère mais aussi d'avoir une connaissance suffisante de leur distribution spatiale afin d'obtenir une bonne description des flux et des propriétés de transport dans le système aquifère. L'obtention de telles informations est donc primordiale pour assurer une modélisation numérique robuste et des prédictions fiables sur l'évolution de la ressource en eau et le transport de polluants. De telles informations sont donc nécessaires pour améliorer la gestion de la ressource en eau tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif.

Plusieurs méthodes pour régionaliser la perméabilité, la transmissivité et la porosité à l'échelle de systèmes aquifères ont été proposées mais elles ne sont applicables, en général, qu'aux aquifères alluviaux et sédimentaires. Ces méthodes utilisent l'information géologique (faciès et génétique) et un très grand nombre de données hydrodynamiques déduits de tests hydrauliques (Kolterman et Gorelik, 1996 ; Aboufirassi et Marino, 1984 ; Ahmed et de Marsily 1987 ; Nastev et al., 2004 ; de Marsily et al., 2005 ; Patriarche et al., 2005 ; Li et al., 2007 ; Pardo-Iguzquiza et al., 2009 ; etc.). D'autres méthodes sont basées sur la modélisation inverse des niveaux piézométriques (Neuman, 1973 ; de Marsily et al., 1984 ; Yeh, 1986 ; Kool et al., 1987 ; Zimmerman et al., 1998 ; Carrera et al. 2005 ; etc.) ou basées sur les relations entre propriétés géophysiques et hydrogéologiques (Jones et Buford, 1951 ; Kelley, 1977 ; Urish, 1981 ; Frohlich et al., 1996 ; Vouillamoz et al., 2005, 2014 ; [31]). Cependant, toutes ces méthodes nécessitent des investigations de terrain très détaillées, car nécessitant de nombreuses données, et ne sont pas toujours adaptées aux aquifères de socle.

Dans les aquifères de socle (granites et roches métamorphiques), le problème de régionalisation devient encore plus complexe à cause de la forte hétérogénéité du système. Le degré de fracturation et la connexion entre les réseaux de fractures induit une forte variation des propriétés aquifères à toutes les échelles, conduisant à des flux d'eau souterraine complexes (Paillet, 1998 ; Maréchal et al., 2004 ; Le Borgne et al., 2004, 2006 ; [12, 14] ; etc.). C'est certainement pourquoi la plupart des auteurs ont choisi de réaliser des cartes de classification de transmissivité ou du potentiel aquifère plutôt que de cartographier les propriétés hydrodynamiques de ces aquifères (Krásný, 1993, 2000 ; Darko et Krásný, 2007 ; Madrucci et al., 2008 ; Dhakate, et al. 2008 ; Courtois et al., 2010). Cependant, quelques auteurs présentent des cartes de transmissivité à partir de nombreuses données d'essai par pompage (Razack et Lasm, 2006) ou à l'aide de relations empiriques entre propriétés géophysiques et hydrogéologiques [31]. Cependant, elles aussi nécessitent des acquisitions lourdes et nombreuses de terrain et ont tendance à surestimer les propriétés car elles se focalisent sur les données où des essais par pompage ont pu être réalisés, donc souvent sur les secteurs les plus productifs.

Au cours des dernières décennies, la caractérisation géologique et hydrogéologique des aquifères de socle a fait des progrès très significatifs (cf. § 2 ; Chilton et Foster, 1995 ; Wyns et

al., 1999, 2004 ; Taylor et Howard, 2000 ; Lachassagne et al., 2001a ; Krásný et Sharp, 2007 ; Ayraud et al., 2008 ; Reddy et al., 2009 ; [7, 10, 12, 14, 16, 17, 24, 23, 37*, 41, 45, 47, 49, 52, etc.]). En particulier, ces travaux montrent que lorsque ces roches ont subi une altération supergène, la géométrie et les propriétés hydrodynamiques de tels aquifères sont intimement liées au degré d'altération de la roche mère (voir par exemple Taylor et Howard, 2000 ; [37*]). Par exemple, comme vu précédemment, dans les roches granitiques, le profil d'altération type comprend deux principaux niveaux subparallèles à la surface contemporaine de l'altération : un niveau de saprolite, peu perméable mais en général caractérisé par une porosité importante et un horizon fracturé, caractérisé par une rapide décroissance de la densité des fractures en fonction de la profondeur ; c'est le niveau le plus perméable de l'aquifère mais aussi le moins poreux. Plus bas, la roche n'est pas fracturée et n'est perméable que localement à l'aplomb de structures tectoniques (failles) caractérisées par des propriétés très variables (voir Figure 4).

Basé sur ce concept d'aquifère stratiforme, j'ai proposé avec des collègues du BRGM et des universités de Rennes et de la Réunion des méthodes alternatives et novatrices afin de régionaliser la perméabilité et la porosité à l'échelle d'aquifères de socle [2*, 3, 21*]. Ces méthodes sont basées sur un concept très simple : les variations piézométriques à grande échelle peuvent renseigner sur la distribution des propriétés hydrodynamiques d'un aquifère.

2.3.1. La perméabilité

La première méthode sur laquelle j'ai travaillé pour régionaliser la perméabilité de la zone fracturée repose sur la comparaison des distributions statistiques de la perméabilité (issue d'essais slug test) et du débit linéaire d'ouvrages en exploitation (rapport Q/H ; Q : débit du forage et H : hauteur mouillée de l'aquifère au niveau du forage) ; [21*], disponible en annexe. L'idée est d'utiliser la grande quantité de données disponibles sur les ouvrages en exploitation (données de débit ; $n=678$ sur le bassin versant de Maheshwaram d'environ 50 km^2) afin de produire une carte de perméabilité, ce qui n'est pas possible à partir des seules valeurs de perméabilité ($n=44$) étant donné leurs trop fortes variabilités (4 à 5 ordres de grandeur). Cette méthode fait l'hypothèse que les données de perméabilité et les ratios Q/H sont représentatifs de l'aquifère fracturé du granite, c'est-à-dire que les deux ensembles de données sont distribués de manière aléatoire et qu'ils sont caractérisés par une gamme de variations suffisamment grande permettant de bien caractériser le milieu. La méthode proposée consiste à calculer la perméabilité pour chaque emplacement d'ouvrages exploités à partir de l'établissement de la meilleure relation empirique reliant les 2 distributions statistiques (distributions log-normales) tout en respectant l'hypothèse de Thiem-Dupuit d'une relation linéaire entre Q/H et la perméabilité, avec la contrainte que la distribution calculée respecte la moyenne et la dispersion des données de perméabilité mesurées (Figure 31). Ensuite, la perméabilité modélisée est spatialisée en utilisant les techniques d'interpolation classiques de géostatistique (analyse variographique et krigeage ; Figure 32). Afin de juger de la pertinence de la carte produite, la perméabilité calculée de la carte est comparée à celle estimée en chaque forage où un essai slug test a été réalisé ; rappelons que les données de perméabilité slug test ne servent qu'à établir une relation statistique mais qu'elles ne rentrent pas dans l'établissement de la carte. Pour l'exemple donné (Figure 32), la comparaison entre les valeurs calculées (LogKm) et les valeurs mesurées montrent que dans 89% des cas LogKm est estimé avec une erreur inférieure à 20%, ce qui correspond dans ce cas en moyenne à $\text{LogKm} \pm 0,4$. Le résultat est donc très convaincant étant donné la forte hétérogénéité du système étudié. La carte (Figure 32) montre une distribution relativement homogène de la perméabilité sur des surfaces de l'ordre de quelques km^2 . Elle montre aussi que l'horizon fracturé est un milieu relativement bien connecté et pourvu d'une certaine homogénéité. Ce dernier point pourra être pris comme un sérieux avantage en modélisation numérique tant en ce qui concerne la modélisation des niveaux que celui du transport de solutés. Si l'on peut douter de la réalité de la valeur estimée de la perméabilité en un point donné, il ressort une bonne cohérence des zones

à fortes et faibles perméabilités dont le zonage pourra être utilisé, par exemple, pour contraindre le calage d'un modèle numérique.

Cependant, les valeurs extrêmes, de très fortes et de très faibles perméabilités, ne sont pas bien reproduites par la carte (Figure 32, graphe de droite) probablement car ces valeurs correspondent à des zones d'extension très limitées, vraisemblablement de quelques dizaines de m², et non représentatives des propriétés à l'échelle de quelques centaines de m², soit l'échelle de résolution de la carte (ici mailles de 20x20 m).

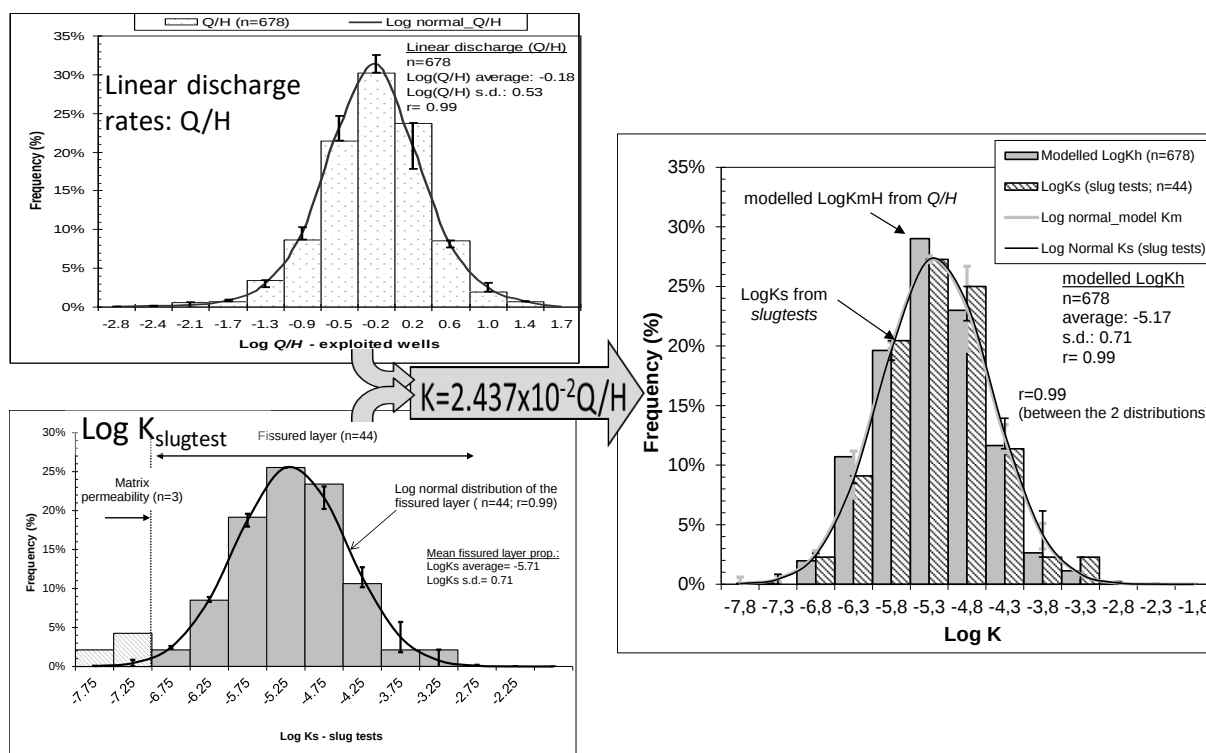
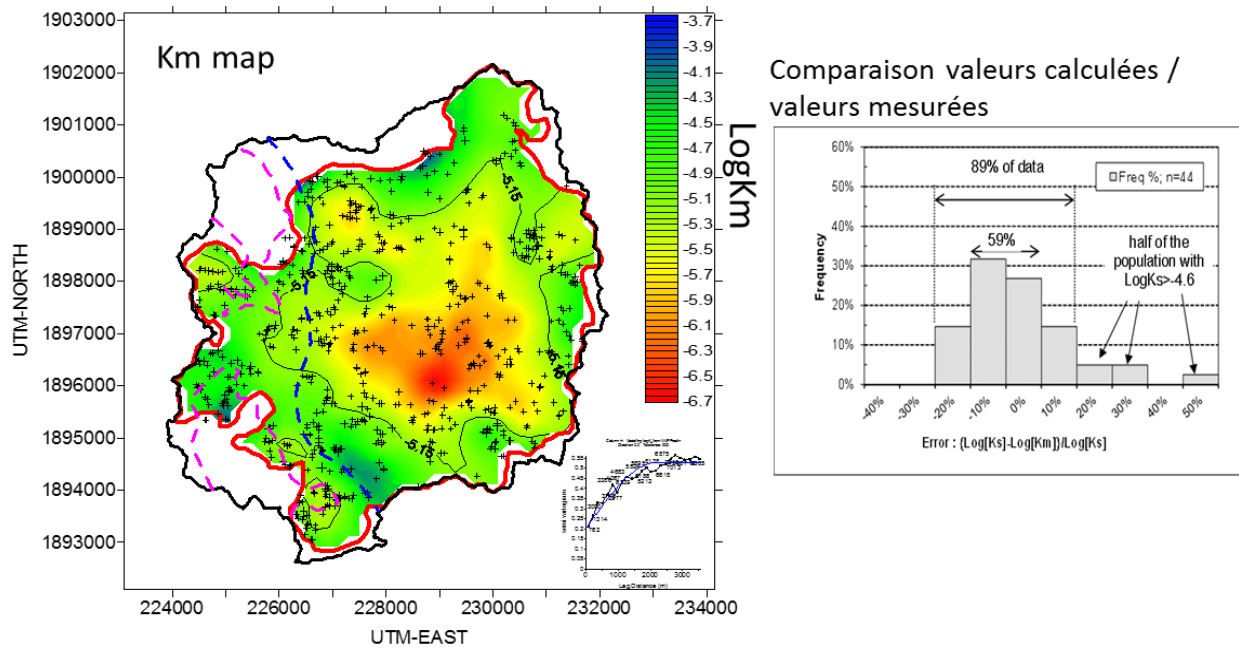


Figure 31 : établissement d'une relation empirique entre les distributions de débit linéaire (Q/H) et la perméabilité de l'horizon fracturé d'un granite déduit d'essai slug tests (K_{slugtest}) ; Maheshwaram, Inde (tiré de [21*]).



Les traits en pointillés bleus et violets représentent les contours de différents granites.

Une seconde méthode, plus récente, a été développée afin d'estimer le champ de perméabilité dans un aquifère de socle [2*] (disponible en annexe) mais cette fois dans un secteur où il n'y a pas d'ouvrage exploité, et où l'on dispose d'une importante densité de piézomètres d'observation permettant l'établissement de cartes piézométriques détaillées. La méthode proposée pour évaluer le champ de transmissivité, ou de perméabilité, est toujours basée sur le concept que les variations à grande échelle de la charge hydraulique peuvent donner des informations sur les propriétés à grande échelle de l'aquifère. Dans le cas où l'aquifère est naturellement drainé (absence de pompage dans les eaux souterraines), où le flux vertical souterrain peut être négligé, où le niveau de la nappe est en état pseudo-permanent et est principalement contrôlé par la topographie plutôt que par la recharge (Haitjema et Mitchell-Bruker, 2005), on peut supposer que le gradient de la nappe dépend à la fois de la pente topographique et de la transmissivité horizontale de l'aquifère. A titre d'exemple, dans le cas d'une topographie relativement plane et où l'écoulement des eaux souterraines est horizontal, l'application de l'équation de continuité le long d'une même ligne de courant (loi de Darcy ; $Q = T_1 \text{grad} h_1 = T_2 \text{grad} h_2 \dots$; T_i : transmissivité du compartiment i et h_i sa charge hydraulique) montre de faibles gradients hydrauliques là où la transmissivité est élevée et de forts gradients là où elle est faible. Par conséquent, lorsque la topographie varie peu la variation du gradient hydraulique dépend en première approximation des variations de la transmissivité de l'aquifère, en fait de manière inversement proportionnelle au gradient hydraulique. Par contre, dans le cas où les variations d'altitude sont non négligeables il faudra avant d'obtenir des informations sur la transmissivité « éliminer » l'influence de l'altitude sur la piézométrie, en général il s'agit d'une relation linéaire. Une fois la tendance enlevée, la pente de cette piézométrie résiduelle est calculée puis comparée de manière statistique afin de produire un champ de transmissivité, ou de perméabilité si l'information sur l'épaisseur de l'aquifère est disponible. Comme dans la méthode précédente, on cherchera à évaluer la meilleure relation empirique possible entre les deux distributions statistiques (Figure 33). Pour que l'analyse soit pertinente, il faut aussi que les deux ensembles de données décrivent tout le système. Puis, la perméabilité modélisée est spatialisée, et la pertinence de la carte produite jugée sur la base des mesures locales de transmissivité (ou de perméabilité) ; là aussi les

mesures directes ne rentrent pas dans l'établissement de la carte. La présente méthodologie a été appliquée au Massif de Tiébaghi en Nouvelle Calédonie (3,5 km²), la comparaison entre les valeurs de transmissivité calculées et celles déduites de 28 essais hydrauliques montre une erreur inférieure à 20% dans 71% des cas ($\text{LogT} \pm 0,4$), et une erreur inférieure à 10% ($\text{LogT} \pm 0,2$ en moyenne) dans 39% des cas (Figure 34). A partir de cette carte, une carte de conductivité hydraulique a été réalisée, donnant des valeurs s'étalant sur 8 ordres de grandeur. La répétabilité de l'approche a aussi été testée sur un second jeu de données piézométriques, les résultats sont très proches avec seulement 11% de différence en moyenne entre les deux cartes [2*]. Cette méthode, simple, montre ainsi des résultats très pertinents. Cependant, comme dans la méthode précédente et pour les mêmes raisons a priori, la méthode a du mal à reproduire les valeurs extrêmes. Du point de vue géologique (voir le tracé des fractures sur la Figure 34), les résultats mettent nettement en évidence le contrôle et la compartimentation de la distribution spatiale de la transmissivité (et de la perméabilité) par le réseau de failles de ce massif ultramafique. Toutefois, les failles sont principalement caractérisées par des zones à faible perméabilité ce qui diffère du cas général des autres aquifères cristallins. Ce résultat est vraisemblablement lié au fait que les produits d'altération des péridotites sont très argileux.

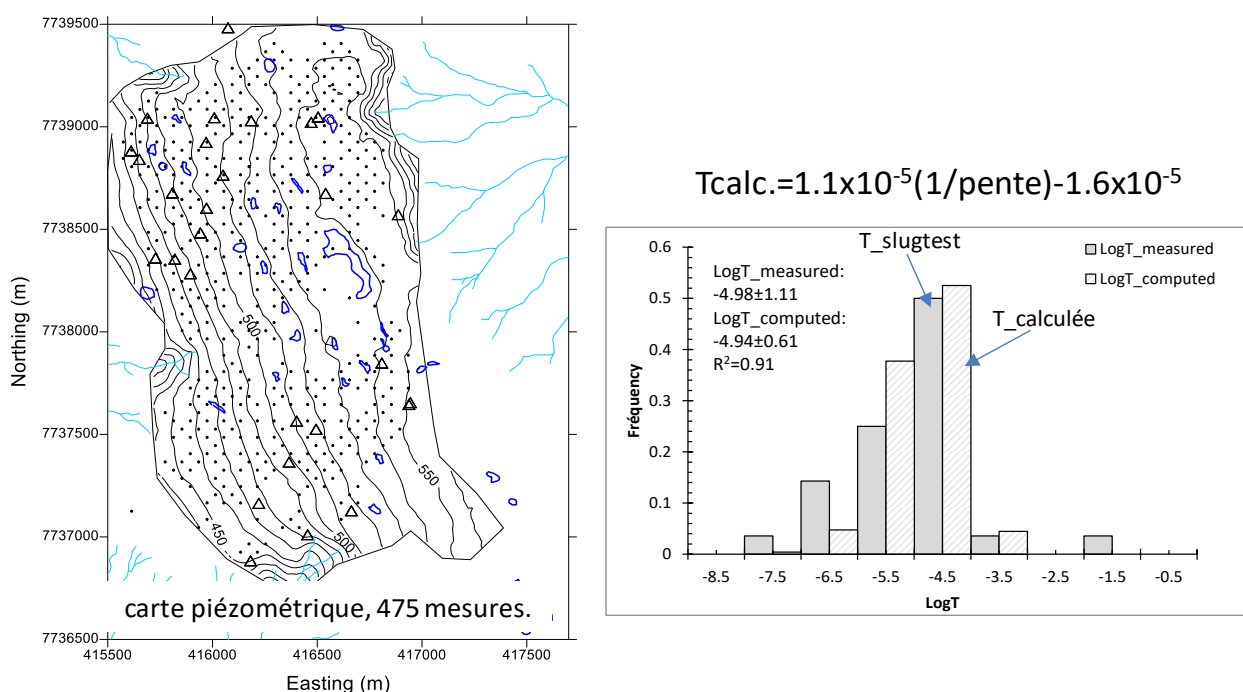
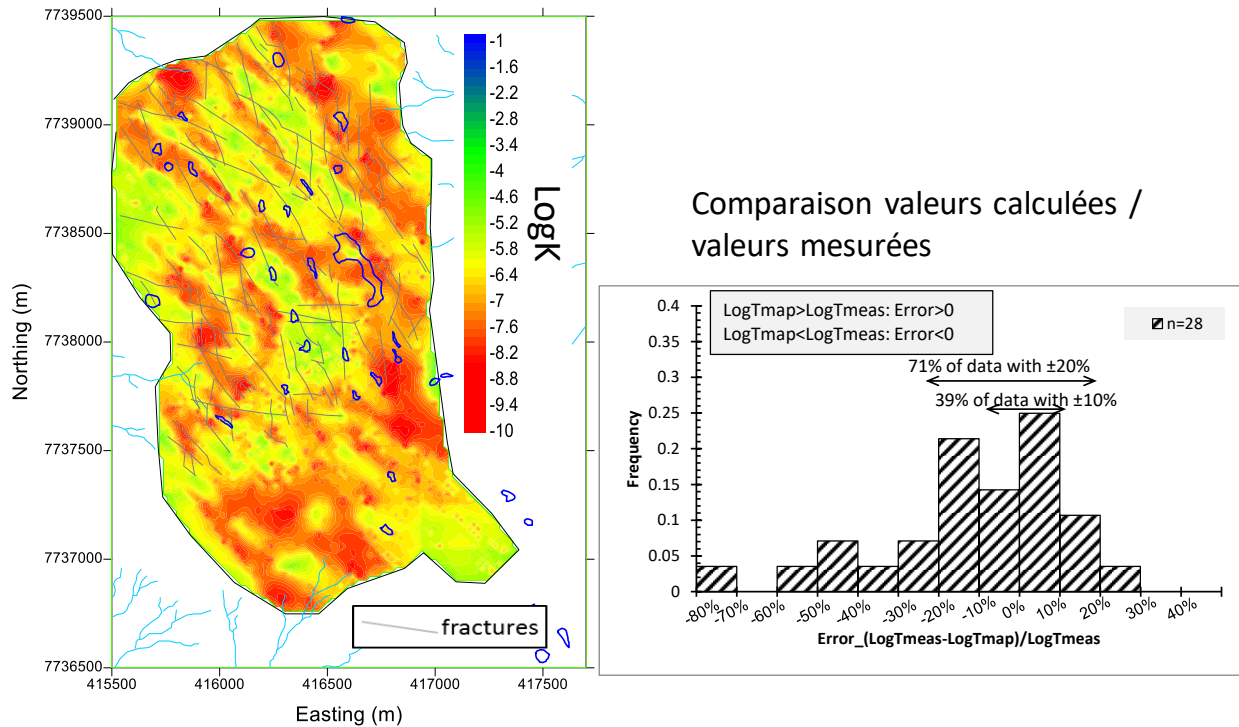


Figure 33 : à gauche : carte piézométrique, à droite : établissement d'une relation empirique entre les distributions de la pente de la piézométrie résiduelle et la perméabilité déduite d'essais slug tests, horizon fracturé d'un aquifère de péridotite ; Nouvelle Calédonie (tiré de [2*]).

Pour la figure de gauche : les points représentent les observations piézométriques (n=475), les triangles les ouvrages où des tests hydrauliques ont été effectués (n=28) et le figuré bleu le contour des dolines.



2.3.2. La porosité (efficace)

La méthode de régionalisation de la porosité que j'ai proposée est basée sur une approche combinant les techniques de bilan d'aquifère et de fluctuation de nappe, et une méthode d'agrégation spatiale permettant de s'affranchir des flux horizontaux dans l'aquifère à partir d'une certaine échelle (cf. [21*], disponible en annexe). Cette méthode est adaptée aux secteurs fortement exploités et a été appliquée sur des bassins versants granitiques en Inde.

A l'échelle d'une cellule de bassin versant et en absence de recharge, la porosité efficace, S_y , peut être obtenue à partir d'une équation de bilan classique (Schicht & Walton, 1961; [35, 38, 50, 51]) :

$$S_y = (Q - RF + q_{\text{off}} - q_{\text{on}}) / \Delta h$$

Où Δh : fluctuation de la nappe, Q : pompage, RF : flux d'irrigation de retour à la nappe, q_{on} et q_{off} : flux souterrains rentrant et sortant de l'aquifère. Dans le cas traité, le bassin versant de Maheshwaram (mais aussi pour d'autres bassins versants en Inde), comme la nappe est profonde et déconnectée de la surface, l'évaporation de la nappe et le débit de sources et des cours d'eau sont négligés (absence de cours d'eau ou source pérenne). Dans cette équation seuls q_{on} , q_{off} et S_y sont inconnus, les autres paramètres pouvant être estimés à partir de mesures de terrain [30, 32, 35, 38].

Le principe de la méthode de spatialisation consiste à regarder comment les termes du bilan changent lorsque le calcul est fait sur des tailles de cellules de plus en plus grandes. Comme l'aquifère est fortement pompé la composante principale d'écoulement est verticale (Q et RF), sauf près des pompages où les flux horizontaux peuvent être importants. Ces flux horizontaux

peuvent exister à petite échelle mais disparaissent pour les grandes tailles de cellules, jusqu'à un seuil qui dépend de l'espacement des pompes et des propriétés aquifères. Donc la méthode consiste à trouver une taille de cellules à partir de laquelle le terme ' $q_{off}-q_{on}$ ' devient négligeable devant ' $Q-RF$ '. C'est ce que montre la Figure 35 où au-delà d'une taille de cellule d'environ 500 m la valeur moyenne de la porosité efficace à l'échelle du bassin versant se stabilise et rejoint les valeurs estimées à l'échelle globale du bassin versant (0,014 à 0,015 ; [28, 34, 38]). Une fois la taille de cellule choisie, dans ce cas 500x500 m ou plus, les valeurs de Sy sont interpolées en utilisant les techniques de la géostatistique pour produire une carte de la porosité efficace au niveau de la zone de fluctuation piézométrique (Figure 36).

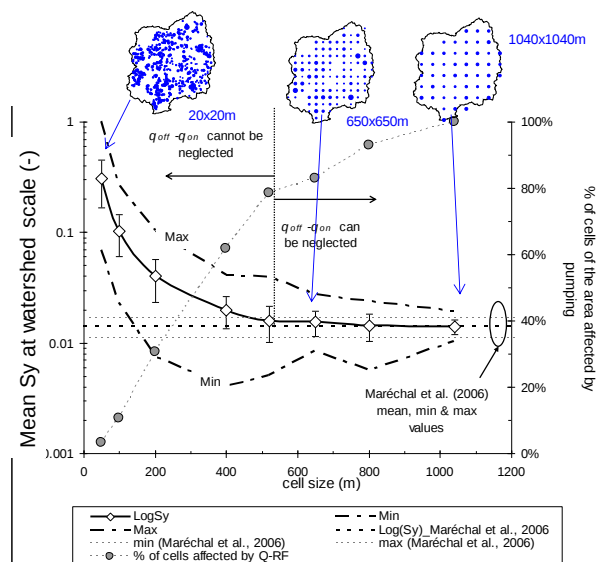


Figure 35 : évolution de la valeur moyenne calculée de la porosité efficace (Sy) en fonction de la taille des cellules. Sont aussi représentés : valeurs min et max, écart type et le pourcentage de cellules où il y a des pompes. Application au bassin versant de Maheshwaram Inde (tiré de [21*]).

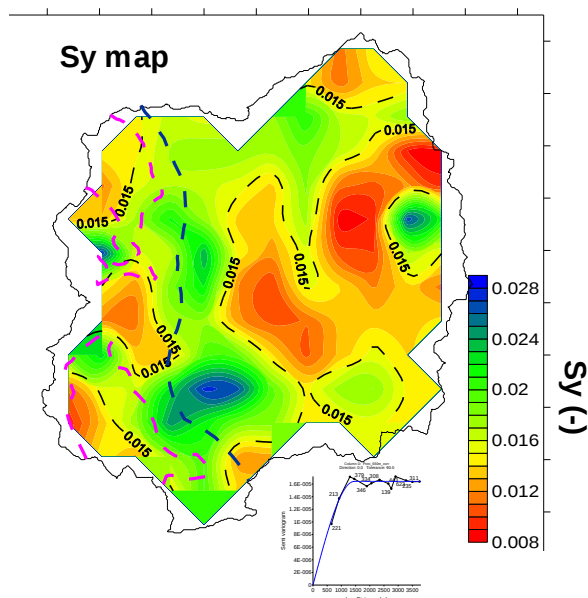


Figure 36: évaluation du champ de porosité efficace (Sy) de la zone de fluctuation piézométrique ; valeur moyenne : 1,5%. Taille des cellules de calcul : 650x650 m. Application au bassin versant de Maheshwaram, Inde (tiré de [21*]).

Initialement développée pour estimer le champ de porosité pour la zone de battement de la nappe, j'ai récemment étendue la méthode de régionalisation en 3-D afin de disposer d'une description complète du champ de porosité sur l'ensemble de l'épaisseur aquifère [3]. Ceci a été rendu possible par la connaissance de la géométrie des profils d'altération (interface saprolite-zone fracturée et base de l'horizon fracturé). En effet, chaque valeur de la carte de porosité précédente est associée à une localisation précise au sein du profil d'altération (Figure 37). Ainsi, pour estimer le champ 3D le système est découpé en intervalles selon l'interface saprolite-zone fracturée permettant de différencier les deux principaux niveaux de l'aquifère (saprolite et zone fracturée) et d'obtenir des estimations de S_y suivant la position sur ou sous l'interface (Figure 37). Ensuite, les valeurs de S_y de chaque intervalle sont analysées (statistiques et analyse variographique) et le champ de porosité de l'intervalle obtenu par méthode de krigeage. La technique est donc une cartographie 3D de la porosité basée sur la cartographie de la porosité de différents intervalles de profondeur.

Cette méthode a été appliquée et testée sur deux grands bassins versants en Inde (Kudaliar : 983 km² et Anantapur : 730 km²) ; [3]. Elle est basée sur l'analyse d'images satellitaires, pour l'évaluation des débits d'exploitation de l'aquifère, et de données de terrain à acquisition facile (mesures piézométriques, cartographie du profil d'altération). Pour des raisons de densité de valeurs de S_y , l'intervalle de profondeur minimal a été fixé à 5 m pour une résolution au km² environ. La Figure 38 présente les champs de S_y des intervalles de profondeur au sein du profil d'altération. La Figure 39 présente une coupe N-S montrant parfois, comme attendu, une diminution de S_y en fonction de la profondeur, mais surtout une très forte variabilité spatiale suggérant qu'au sein d'un même profil d'altération la densité des fractures ouvertes et/ou le degré d'altération de la zone fracturée peut varier sensiblement d'un endroit à un autre.

Dans les aquifères cristallins, très peu de données sont disponibles sur la distribution verticale de S_y . Les estimations basées sur les profils RMP -sondages à résonance protomagnétique (Wyns et al., 2004 ; Baltassat et al., 2005 ; Vouillamoz, et al., 2002, 2005, 2014), soulignent une diminution de S_y en profondeur interprétée comme une diminution de la densité de fractures en profondeur et du degré d'altération. La Figure 40, obtenue à partir de champs de porosité 3-D, montre comment la moyenne des valeurs de S_y varie en fonction de la profondeur au sein du profil d'altération à l'échelle des deux bassins versants. Pour Kudaliar (granite à biotite), S_y est quasi constant des derniers mètres de la saprolite jusqu'à 12-15 m dans la zone fracturée (0,013 à 0,014), puis diminue à moins de 0,005 pour la partie la plus profonde de l'horizon fracturé (20 – 25 m). Sur l'autre bassin (Anantapur, gneiss à hornblendes), la variation de S_y en fonction de la profondeur est différente : dans la saprolite elle est en moyenne plus importante (environ 0,04), puis diminue rapidement dans les 15 premiers mètres de la zone fracturée (< 0,004 pour l'intervalle de profondeur de 10 – 15 m). Ces résultats montrent qu'à l'échelle du bassin versant et en fonction de la géologie et de la structure du profil d'altération, la distribution verticale de la porosité peut être très différente et que les horizons fracturés dans les aquifères de socle ne sont pas nécessairement caractérisés par une rapide diminution de la porosité avec la profondeur comme communément admis. D'autres analyses sur d'autres bassins versants devraient être menées pour vérifier cette observation.

Ces évaluations du champ de porosité ont permis de montrer que ce paramètre hydrodynamique est très variable dans l'espace pour un même aquifère et donc qu'il est nécessaire d'en avoir une description aussi fine que possible pour bien approcher les propriétés de flux et de transport. Ces champs permettent aussi d'établir des estimations en 3-D de la quantité d'eau disponible dans l'aquifère à une échelle relativement fine (de l'ordre du km²), information indispensable et primordiale pour tout ce qui concerne la gestion de la ressource. Ils peuvent aussi aider à la recherche de nouvelles ressources, à leurs protections, notamment en évaluant la vulnérabilité de l'aquifère face à l'activité anthropique (pompage, rejets) et climatique.

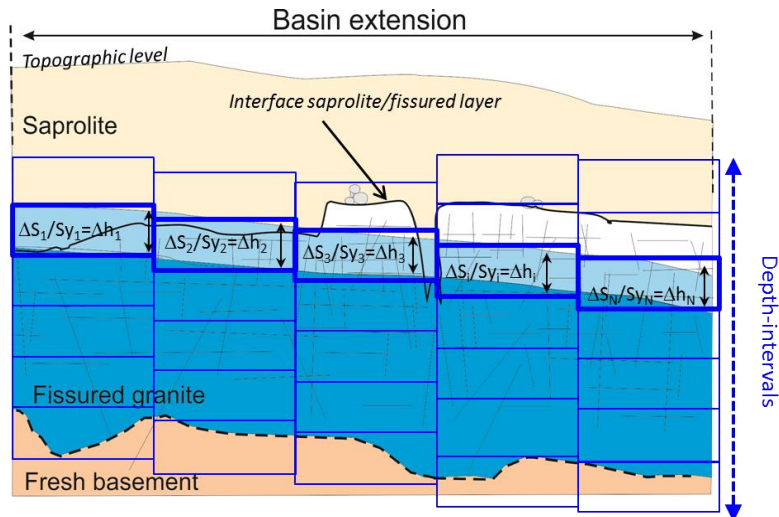


Figure 37 : schéma de calcul de la porosité efficace (Sy) pour chaque intervalle de profondeur, par rapport à l'interface entre les saprolites et la zone fracturée (tiré de [3]).

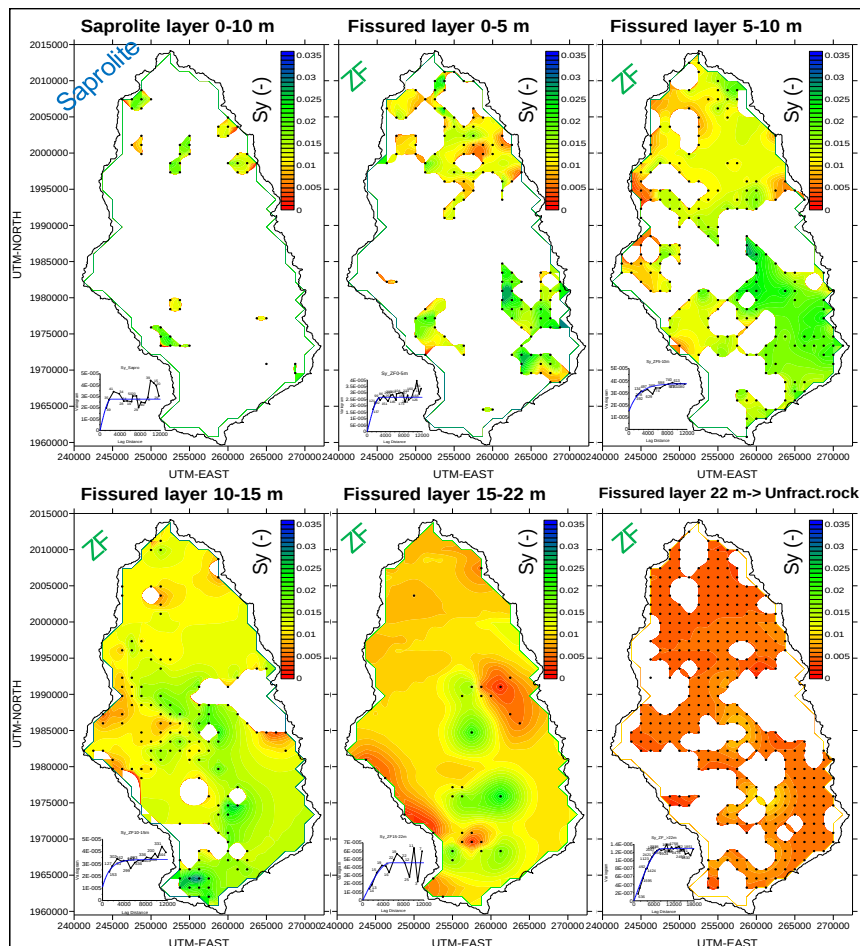


Figure 38 : estimation des champs de porosité efficace (Sy) par intervalle de profondeur au sein du profil d'altération (saprolite et ZF : zone fracturée). Bassin versant de Kudaliar, 983 km², Inde (tiré de [3]).

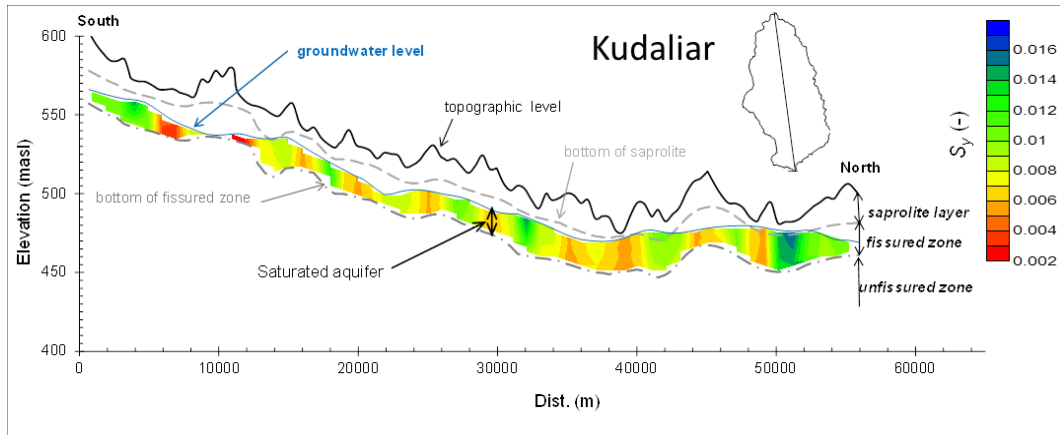


Figure 39 : coupe du champ de porosité efficace (S_y). Coupe NS, bassin versant de Kudaliar, Inde (tiré de [3]).

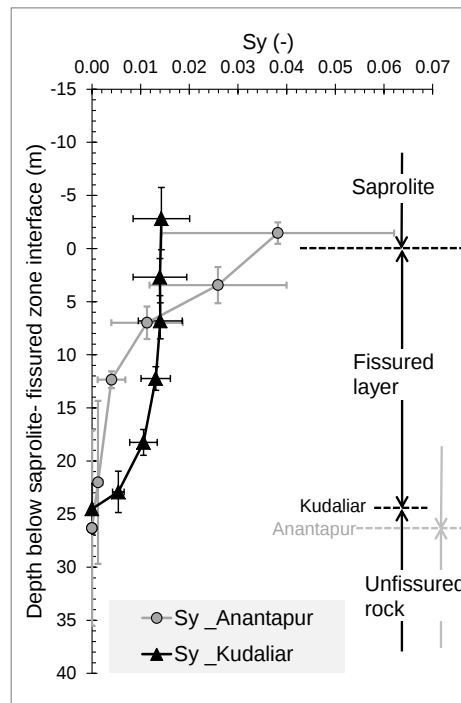


Figure 40 : variations verticales moyennes de S_y dans le profil d'altération des deux bassins versants de Kudaliar et Anantapur ; les barres représentent les écarts-types (tiré de [3]).

3. Perspectives de recherche

Dans les prochaines années, je souhaite approfondir mes recherches dans les trois thématiques qui viennent d'être décrites. Les paragraphes qui suivent présentent les futures pistes, dont certaines sont déjà un peu explorées.

3.1. MODELES CONCEPTUELS

Depuis une vingtaine d'années, le concept de l'hydrogéologie des aquifères de socle a fait des progrès très significatifs. Il a remis en question en grande partie l'ancien concept (Figure 3) passant d'un modèle très compartimenté verticalement, discontinu et peu connecté horizontalement où la présence d'eau n'était attribuable qu'à la présence de failles d'origine tectonique ou liées à la décompression des terrains, à un modèle sub-horizontale, relativement connecté spatialement, où les propriétés aquifères sont héritées des processus d'altération (Figure 4).

Si les études ont relativement bien décrit le fonctionnement hydrogéologique des aquifères au sein de granitoïdes soumis au processus d'altération, peu d'études et d'informations sont disponibles sur les autres roches de socles : schistes, metabasites, gneiss, etc. Un des futurs axes de recherches devrait donc se tourner vers ces systèmes. Ces roches soumises au processus d'altération permettent le développement d'aquifères en association avec les différents niveaux du profil d'altération. Cependant, leurs géométries apparaissent souvent plus complexes, en fonction de la texture, de la minéralogie et de l'orientation de la schistosité ou du litage des roches. Par exemple, le profil d'altération des paragneiss de La Salvetat est caractérisé par une géométrie en « tôle ondulée » où les approfondissements du profil sont associés aux séries les plus carbonatées [20], ou encore celui du profil des gneiss à foliation sub-verticale en Inde du Sud où l'alternance d'enclaves amphibolitiques créent aussi ce type de structure (Braun et al., 2009). Par contre, dans d'autres formations métamorphiques, comme les schistes du Briovérien près de Rennes, la structure du profil d'altération est relativement stratiforme rappelant celle d'un profil dans les granites (Wyns et al., 2004 ; [17]). Des études mettant en relation structure de la roche, sa schistosité notamment, et géométrie des profils, devraient permettre de mieux comprendre la structure des aquifères au sein de ces formations. Une thèse devant démarrer sur les aquifères des roches de socle du bouclier des Guyanes (granodiorite, schistes, metabasites, etc.) devraient permettre de répondre en partie à ce questionnement.

Les travaux pluridisciplinaires basés sur la géologie, l'hydrogéologie, l'hydraulique, l'hydrogéochimie, mais aussi la modélisation devrait permettre de mieux comprendre les aquifères de socle. En effet, dans ce cas l'outil de modélisation (modèles maillés ou globaux), d'autant plus pertinent qu'il peut intégrer transfert de pression et transport réactif, est vu comme un outil visant à tester la robustesse d'un modèle conceptuel [4, 20], voire l'améliorer, et non uniquement comme un simulateur destiné à la prédiction. Ces travaux devraient être menés à l'échelle de bassins versants, mais aussi continuer à s'intéresser à mieux décrire, à plus petite échelle, le fonctionnement de zones de failles et de systèmes carbo-gazeux. Aussi, ils devraient s'intéresser aux zones de montagnes où les profils d'altération sont en général peu ou pas développés, et le fonctionnement hydrogéologique peu ou pas décrit.

Un autre point où il me semble aussi intéressant d'avancer concerne les processus de formation des horizons très altérés (Braun et al., 2016) et surtout sur le déterminisme de la fracturation d'origine supergène. De récents travaux, prometteurs, montrent la capacité d'une roche à se fracturer suite à un changement d'état minéralogique (péridotites : Rudge et al., 2010 ; granites : Vasseur et Lachassagne, 2018). Il serait intéressant afin de poursuivre ces travaux de développer des modèles capables de simuler la formation de profils d'altération et de comparer les résultats

à des cas réels. De tels modèles devraient permettre de mieux comprendre la structure géométrique des profils d'altération, en particulier ceux où la roche n'est pas « homogène », comme dans les formations métamorphiques.

D'un point de vue pratique, ces futurs travaux devraient contribuer à mieux localiser les zones productives d'un aquifère, pour par exemple y implanter des forages, et à mieux gérer et protéger la ressource en eau souterraine des régions de socle.

3.2. L'INTERPRETATION ET LA MODELISATION DES ESSAIS PAR POMPAGE

Les modèles numériques dont nous disposons sont capables de simuler une infinité de cas d'aquifères et donc de reproduire des essais par pompage pour une très grande diversité de situations. Cependant, nous disposons rarement des informations nécessaires à l'établissement d'un modèle numérique lorsque nous devons interpréter un essai par pompage : méconnaissance de la géométrie de l'aquifère ou des conditions aux limites, etc., d'où mon intérêt pour continuer à développer des modèles analytiques. D'ailleurs, ces deux types de modèles ne sont pas en opposition, ni en compétition, puisque d'ordinaire on a besoin de définir les propriétés et le schéma conceptuel à partir de l'analyse des pompages suivant ces solutions analytiques (géométrie, propriétés hydrodynamiques) avant de créer le modèle numérique. En somme, cette étape « analytique » est nécessaire à la réalisation du modèle numérique.

D'un point de vue diagnostic, les techniques basées sur la dérivée des rabattements, ou sur les dimensions d'écoulement, sont des outils très pertinents susceptibles de renseigner très rapidement sur le fonctionnement d'un système aquifère (socle ou non) et donc participer à l'élaboration de leur schéma conceptuel (cf. § 3.1). Seulement, et ceci est en particulier valable pour les milieux fracturés comme le socle, le diagnostic n'est pas univoque, c'est-à-dire que plusieurs modèles mathématiques (analytiques) peuvent répondre au diagnostic posé. Si souvent l'information géologique disponible permet d'aiguiller vers le modèle mathématique le plus approprié, il arrive que le problème reste indéterminé. Une solution que nous avons commencé à mettre en œuvre récemment est le couplage de l'essai par pompage avec un suivi hydrogéochimique (éléments majeurs, traces, isotopes, datation, etc.). Ce suivi permet de discriminer l'origine de l'eau durant le pompage [13*, 17] et donc d'améliorer la performance du diagnostic. Cependant, les modèles d'interprétation/modélisation des essais doivent aller plus loin que la seule modélisation des rabattements en intégrant des calculs de flux. Par exemple, la part d'eau en provenance d'un aquitard, d'aquifères latéraux, d'un cours d'eau, ou de telle ou telle fracture. C'est donc essentiellement dans cette optique que je compte poursuivre mes futurs développements.

Un autre point que je souhaite explorer dans les milieux fracturés est le diagnostic d'essais par pompage réalisés lorsque le puits intercepte une ou plusieurs fractures logées dans un aquifère aux propriétés hydrodynamiques non faibles. Dans ce cas, la ou les fractures et la zone crépinée du puits contribuent au débit de pompage de l'ouvrage. En fait, les modèles à fractures inclinées ou horizontales disponibles dans la littérature supposent que les échanges se font uniquement entre la fracture et l'aquifère, négligeant donc ceux entre le forage et l'aquifère. Ainsi, ces modèles ne sont valables, en théorie, que lorsque la transmissivité de l'aquifère est faible, égale ou inférieure à 10^{-7} - 10^{-8} m²/s. C'est dans ce cas que l'on voit apparaître en début d'essai la fameuse pente de 0,5 de la dérivée sur la courbe de diagnostic (écoulement linéaire où le rabattement évolue en fonction de la racine carrée du temps). Hors le modèle présenté au § 2.2b [1*] permet de prendre en compte l'ensemble des échanges et montre que les échanges directs entre le puits et l'aquifère peuvent devenir très significatifs lorsque l'aquifère n'a pas une transmissivité très faible. Parfois même, ces échanges peuvent masquer la signature de la fracture. La signature de la fracture peut être « anormalement » très courte voire même pas visible, pouvant ressembler, à s'y méprendre, au diagnostic d'un essai dans un aquifère de type homogène (Figure 27c). De ce fait, ces échanges directs puits-aquifère peuvent expliquer pourquoi les tests de pompage

dans les milieux fracturés sont rarement interprétés avec des solutions prenant en compte des fractures discrètes recoupées par le puits, mais communément avec des modèles d'aquifère homogène (par exemple, modèles à double porosité ou de type Theis), même si des fractures ont effectivement été reconnues à partir des observations de terrain (Taylor et Howard, 2000, [4, 23, 41]). Une analyse, ne serait-ce que théorique, pour différentes gammes de transmissivité et de hauteurs de section crépinée, permettrait certainement de mieux comprendre les essais dans les milieux fracturés.

3.3. METHODES DE REGIONALISATION DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES, VERS L'AMELIORATION DE LA GESTION DES AQUIFERES DE SOCLE

Cette troisième thématique est certainement la plus intéressante et la plus passionnante à mes yeux pour trois raisons. Premièrement elle résulte de l'aboutissement des travaux de conceptualisation de ces systèmes. Deuxièmement, elle permet de produire des cartes de paramètres que l'on peut utiliser pour la modélisation numérique, la gestion d'aquifère ou l'implantation de forages. Troisièmement, les méthodes sont basées sur des concepts et des données simples à partir desquels on essaie de fournir une information originale, pertinente et la plus détaillée possible. Tout l'attrait de ces méthodes réside donc dans l'utilisation de données d'obtention facile et/ou souvent présentes en grand nombre dans les bases de données, comme la Banque de Données du Sous-Sol (BSS), mais peu ou pas utilisées.

Les paramètres hydrodynamiques issus de ces analyses sont définis avec un certain degré d'incertitude. Il est donc probable que leur utilisation dans des modèles numériques ne puisse pas être directe et qu'un retraitement soit nécessaire. Par exemple, ces analyses sont capables de fournir des informations sur l'hétérogénéité des aquifères et donc de définir les secteurs où les formations géologiques sont les plus et les moins perméables. Les zones à perméabilité différente ainsi délimitées sont ensuite calées avec le modèle numérique par inversion. Cette question de robustesse de l'évaluation des paramètres intéresse le projet MORPHEUS (MéthOdologie de Régionalisation des Propriétés HydrogEologiques des aqUifères de Socle), cofinancé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne sur trois ans. Dans le cadre de ce projet, diverses méthodes de régionalisation des paramètres hydrodynamiques sont mises en œuvre sur de petits bassins versants en Bretagne et testées avec l'appui de modèles numériques. Le projet est en cours et les résultats actuels sont encourageants même avec des champs de perméabilité « bruts ». Ces méthodes, en test aujourd'hui sur de petits bassins, devront être mises en œuvre dans le futur sur des bassins de plus grande dimension à une échelle décisionnaire (plus de 1 000 km²). In fine, leur utilisation devrait permettre d'avoir des modèles numériques plus fiables, notamment pour aborder les problématiques de transport.

Les exemples montrés ici sont donnés pour des milieux de socle, donc plutôt peu perméables, où l'on s'attend, dû à la forte hétérogénéité du système, à avoir de fortes variations locales du gradient hydraulique à cause des fortes variations de transmissivité. Mais qu'en est-il des aquifères beaucoup plus perméables, les variations du gradient hydraulique sont-elles suffisamment importantes pour déceler des changements de transmissivité ? Récemment la méthode de spatialisation de la transmissivité à partir d'information piézométrique (cf. § 3.3 ; Figure 34 ; [2*]) a été appliquée aux formations très perméables du Quaternaire de la plaine du Roussillon dans le cadre du projet Dem'Eau Roussillon (transmissivité moyenne de l'ordre de 10⁻² m²/s). Les résultats sont très convaincants et illustrent l'épaississement des formations alluviales au droit des chenaux (zones à plus forte transmissivité).

Une autre question importante est de définir la densité de mesures requises en termes, par exemple, d'information sur la piézométrie et de nombre de tests hydrauliques pour utiliser ces méthodes de façon raisonnable. C'est un point essentiel sur lequel nous devons travailler. Elle devrait dépendre de l'hétérogénéité de l'aquifère, des aquifères très hétérogènes devant

nécessiter, a priori, d'un réseau d'observation plus dense. Les outils géostatistiques sont attendus pour répondre à cette question.

Les premiers travaux sur l'estimation de la porosité efficace à l'échelle du bassin versant de Maheshwaram (dans ce cas le bassin était pris comme une seule cellule ; [38]) avaient permis, à cause de l'endoréisme du bassin, de développer un outil d'aide à la décision destiné à améliorer la gestion de la ressource en eau souterraine [30, 34]. Cependant, son défaut est de considérer l'aquifère comme une seule et unique entité. Il en résulte que les prédictions du modèle, que ce soit en termes de niveau d'eau ou de scénarios de projection économique comme l'évaluation du salaire moyen des agriculteurs, ne peuvent pas être traitées à plus petite échelle ; tout est donc moyenné à l'échelle du bassin. Le modèle n'est applicable qu'à de petites surfaces ($<100 \text{ km}^2$) et donc difficilement utilisable à une échelle décisionnaire, de l'ordre de $1\,000 \text{ km}^2$ et plus. Cependant, les derniers développements méthodologiques [3, 21*] ont permis d'évaluer le champ de porosité en 3-D et de montrer, pour les bassins versants traités en Inde, qu'à partir d'une dimension de l'ordre du km^2 le système aquifère pouvait être vu comme un ensemble de « pavés » fonctionnant indépendamment des uns des autres, ouvrant ainsi de futurs développements capables de prendre en compte de grands bassins-versants ($>1\,000 \text{ km}^2$) tout en gardant une échelle de résolution acceptable, de l'ordre du km^2 . Basé sur ces nouveaux travaux, un outil d'aide à la décision spatialisé est en cours de développement et de test sur le bassin de Maheshwaram (Thèse A.Nizam, CEFIRE-Inde). Ce bassin n'a pas été choisi à cause de sa taille, mais à cause de l'importante quantité de données dont on dispose depuis les années 2000. Les premiers résultats du modèle sont très encourageants, une porosité efficace en fonction de la profondeur dans le profil d'altération réaliste pour des granites (Figure 41), et une très bonne reconstitution des cartes piézométriques à l'échelle du bassin versant (oct. 2011 à mai 2016, soit 10 cartes piézométriques saisonnières ; Figure 42). Les résultats soulèvent aussi une autre question, celle de la variation spatiale de la recharge. Les cartes produites (Figure 43), malgré une forte différence de pluviométrie annuelle (500 à 1060 mm), révèlent toujours le même genre de structure, avec, en gros, plus de recharge le long du réseau hydrographique. Des travaux de modélisation sont actuellement en cours pour comprendre le déterminisme de la variabilité spatiale de la recharge : effet du type de sol, des zones irriguées, etc. (thèse M. Nicolas, BRGM-Univ. de Rennes).

Ce type de modèle ne remet pas en cause, ni ne se substitue à un modèle numérique classique, il est plutôt complémentaire et certaines de ses données (par ex. champ de porosité) peuvent servir d'entrée au modèle numérique. De plus, il n'a pas besoin d'être alimenté en valeurs de perméabilité, comme pour un modèle numérique, un paramètre associé à une grande incertitude en particulier pour les aquifères de socle. Par contre, ce type de modèle ne permettra pas de résoudre les problèmes de transport.

Les futurs développements de ces techniques de spatialisation des propriétés hydrodynamiques, nécessaires pour travailler sur des bassins versants beaucoup plus grands et d'échelle décisionnelle, seront vraisemblablement associés aux dernières techniques de télédétection (par exemple satellites Sentinelles 1 et 2, images à 10 et 20 m de résolution, [5]). Ces dernières permettront de couvrir de grands territoires et d'avoir les estimations les plus précises possibles sur les surfaces irriguées, les volumes prélevés et les flux d'irrigation de retour aux nappes associés. Ces travaux devront aussi intégrer la variable changement climatique (pluviométrie, évapotranspiration potentielle) et les projections socio-économiques, afin d'avoir les modélisations les plus réalistes possibles.

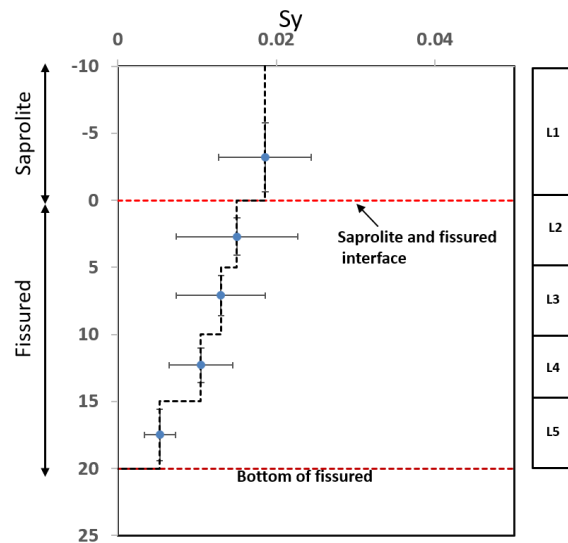


Figure 41 : variation verticale moyenne de la porosité efficace (S_y) dans le profil d'altération du bassin versant de Maheshwaram ; les barres représentent les écarts-types. Calcul issu d'une modélisation 3-D de S_y (tiré de la thèse A.Nizam, publication en cours).

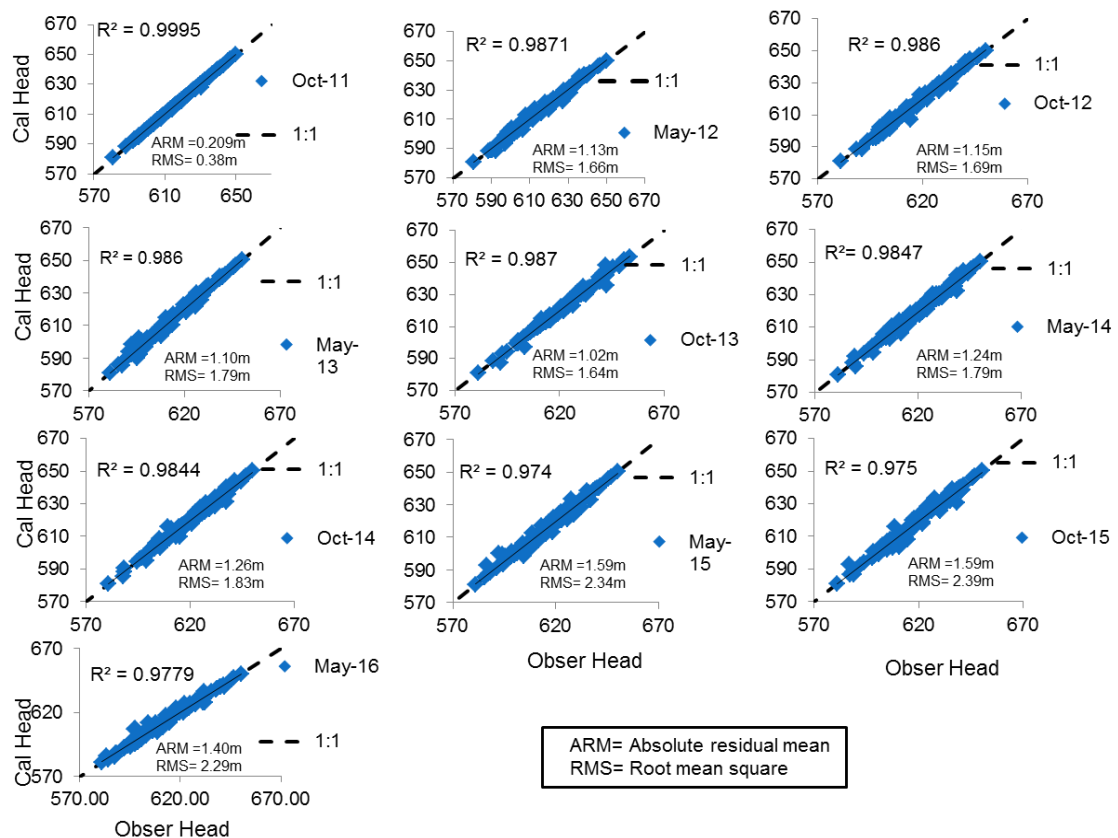


Figure 42 : comparaison entre piézométrie mesurée et calculée sur 10 cartes piézométriques saisonnières entre 2011 et 2016 ; bassin versant de Maheshwaram. Modèle DST_saptial (tiré de la thèse A.Nizam, publication en cours).

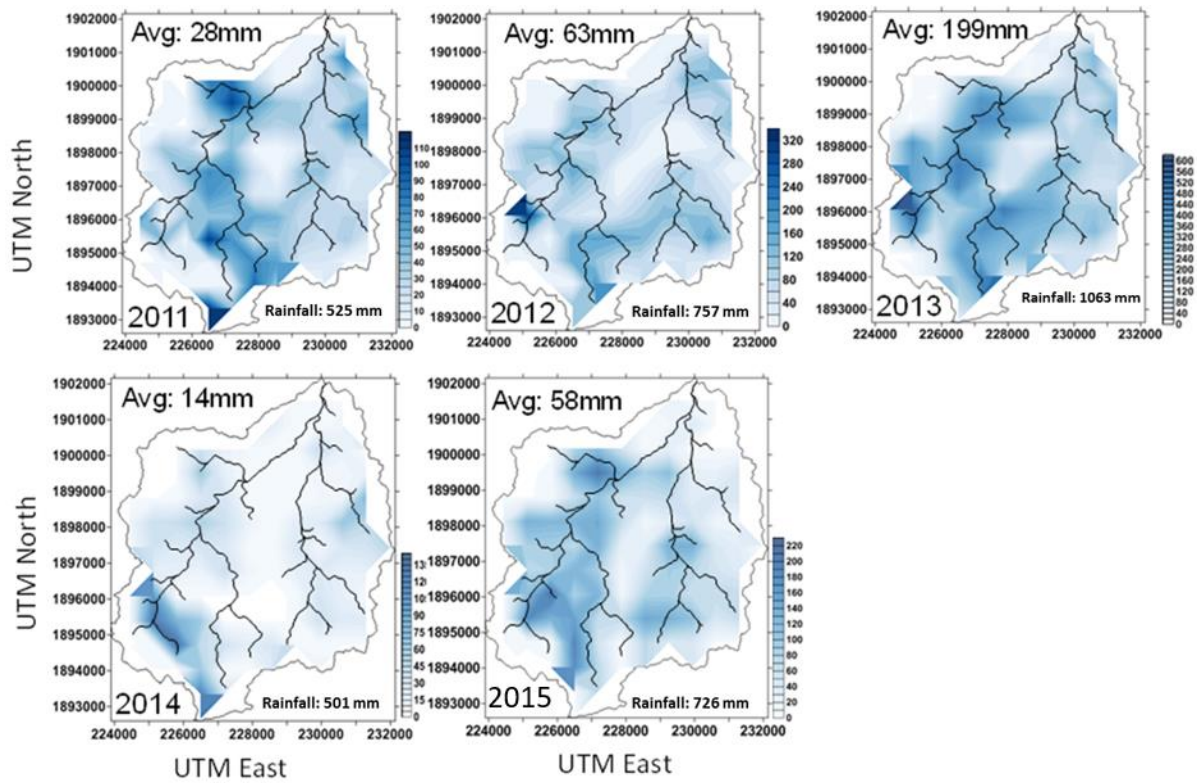


Figure 43 : calcul de la recharge ; résolution 650x650m ; bassin versant de Maheshwaram. Modèle DST_spatial (tiré de la thèse A.Nizam, publication en cours).

4. Conclusion

Comme j'ai pu le souligner déjà plusieurs fois, la connaissance du fonctionnement hydrogéologique des aquifères de socle a grandement évolué pendant les dernières décennies. Malgré cela, bon nombre de points restent encore mal connus : propriétés des aquifères en milieux métamorphiques, rôle des failles, déterminisme de la formation des fractures d'origine supergène, etc. Ces questions ne pourront certainement être résolues qu'avec l'appui de travaux pluridisciplinaires et le développement de nouveaux modèles, qu'ils soient conceptuels, numériques ou analytiques. Les travaux sur les techniques de spatialisation (perméabilité, porosité) sont aussi prometteurs mais demandent à être testés dans un plus grand nombre de cas. La possibilité d'encadrer directement des doctorants que me donnera cette HDR permettra d'avancer plus rapidement sur ces thématiques et créera certainement aussi de nouvelles perspectives de recherche. Cette opportunité me permettra de guider de futurs chercheurs dans leurs travaux et de partager avec eux ce que je sais.

Enfin, même si l'exercice d'écriture d'une HDR demande que l'on utilise la première personne du singulier –j'espère ne pas en avoir abusé ! je –encore !, me dois de donner quelques remerciements, à tous mes collègues hydrogéologues, géologues, géochimistes, géophysiciens, modélisateurs du BRGM, du NGRI, et d'ailleurs, sans qui cette histoire n'aurait pu être écrite, sans ordre de préférence : Vincent Bailly-Comte, Jean-Michel Schroetter, Jean-Christophe Maréchal, Bernard Ladouche, Yvan Caballero, Jean-Daniel Rinaudo, Patrick Lachassagne, Françoise Boudier, Jean-Baptiste Charlier, Hervé Jourde, Alexandre Boisson, Sandra Lanini, Nadia Amraoui, Nathalie Dörfliger, Olivier Bour, Luc Aquilina, Bruno Mougin, Véronique Léonardi, Philippe Vigouroux, Sylvain Massuel, Stéphanie Aulong, Cécile Hérivaux, , Yann Balouin, Shakeel Ahmed, Faisal Zaidi, Phillipe Négrel, Gilian Cadic, Jean-Michel Baltassat, Hélène Pauwels, Elodie Giuglaris, Jérôme Perrin, K. Subrahmanyam, N.S. Krishnamurthy, Subash Chandra, M. Wajiduddin, Perrine Fleury, Claudine Lamotte, Ariane Blum, Sylvain Ferrant, Marc Saltel, Marina Alazard, Benoit Vittecoq, Nicolas Guihéneuf, Alexis Gutierrez, Clément Roques, Julie Jeanpert, Madjid Bouzit,... et j'en oublie !

Un grand merci à Christian Leduc pour avoir gentiment endossé le rôle du tuteur, pour sa relecture du mémoire, ses questions et conseils pertinents.

Je tiens aussi remercier le BRGM, notamment pour son soutien au travers du programme Carnot.

5. Bibliographie

- Aboufirassi M., Marino M.A., 1984. Cokriging of aquifer transmissivity from field measurements of transmissivity and specific capacity. *Math. Geol.*, 16 (1), 19–35.
- Acworth R.I., 1987. The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. *Q. J. Eng. Geol.*, 20, 265-272.
- Ahmed S., de Marsily G., 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resour. Res.* 23 (9), 1717–1737.
- Ayraud V., Aquilina L., Labasque T., Pauwels H., Molenat J., Pierson-Wickmann A.C., Durand V., Bour O., Tarits C., Le Corre P., Fourre E., Merot P.J., Davy P., 2008. Compartmentalization of physical and chemical properties in hard-rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses. *Appl. Geochem.*, 2008, 23 (9), 2686-2707.
- Baltassat J.M., Legchenko A., Ambroise B., Mathieu F., Lachassagne P., Wyns R., Mercier J.L., Schott J.-J., 2005. Magnetic resonance sounding (MRS) and resistivity characterisation of a mountain hard rock aquifer: the Ringelbach Catchment, Vosges Massif, France. *Near Surf. Geophys.* 3, 267–274.
- Barker J.A., 1988. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resources Research*, 24(10), 1796-1804.
- Blasingame T.A., Johnston J.L., Lee W.J., Raghavan R., 1991. Advances in the use of convolution methods in well test analysis. *Soc. Petr. Eng.*, SPE 21826, presented at the SPE Rocky Mountain Regional symposium, Denver, Colorado, 15-17 April.
- Blomqvist R.G., 1990. Deep groundwater in the cristalline basement in Finland, with implications for waste disposal studies. *Geologiska Foereningen i Stockhlom Foerhandlingar*, 112(4), 369-374.
- Bodelle J., Margat J., 1980. *L'eau souterraine en France*, Masson, Paris, p. 208.
- Bourdet D., Whittle T.M., Douglas, A.A., Pirard V.M., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil*, 196, 95-106
- Bourdet D., Ayoud J.A., Prirard Y.M., 1989. Use of pressure derivative in well-test interpretation. *J. Soc. Petr. Eng.*, SPE, 4, 293-302. <https://doi.org/10.2118/12777-PA>.
- Braun J., Mercier J., Guillocheau F., Robin C., 2016. A simple model for regolith formation by chemical weathering. *J. of Geophys. Res.: Earth Surface*, 2140-2171. 10.1002/2016JF003914.
- Braun J.-J., Descloitres M., Riotte J., Fleury S., Barbiéro L., Boeglin J.-L., Violette A., Lacarce E., Ruiz L., Sekhar M., Mohan Kumar M.S., Subramanian S., Dupré B., 2009. Regolith mass balance inferred from combined mineralogical, geochemical and geophysical studies: Mule Hole gneissic watershed, South India. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73(4), 935–961.
- Butler J.J. Jr., Liu W.Z., 1991. Pumping tests in non-uniform aquifers—The linear strip case. *J. of Hydrol.*, 128, 69-99.
- Carrera J., Alcolea A., Medina A., Hidalgo J., Slooten L.J., 2005. Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeology J.*, 13, 206–222.
- Cinco-Ley H., Ramey H.J., Miller F.G., 1975. Unsteady-state pressure distribution created by a well with an inclined fracture. *J. Soc. Petr. Eng.* SPE-5591, doi:10.2118/5591-MS.

Cinco-Ley H., Samaniego F., Dominiguez N., 1998. Transient pressure behaviour for a well with a finite-conductivity vertical fracture. Soc. Petr. Eng. SPE, 18, 253–264.

Chilton P.J., Foster S.S.D., 1995. Hydrogeological characterization and water-supply potential of basement aquifers in tropical Africa. Hydrogeology J. 3(1), 36-49.

Chilton P.J., Smith-Carington A.K., 1984. Characteristics of the weathered basement aquifer in Malawi in relation to rural water supplies. Challenges in African Hydrology and Water Resources, proc. Harare Symposium, July 1984, pp.57-72.

Cho M., Ha K-M., Choi Y-S., Kee W-S., Lachassagne P., Wyns R., 2003. Relationship between the permeability of hard-rock aquifers and their weathered cover based on geological and hydrogeological observation in South Korea. IAH Conference on "Groundwater in fractured rocks", Prague 15-19 September 2003, Prague.

Compaore G., Lachassagne P., Pointet T., Travi Y., 1997. Evaluation du stock d'eau des altérites. Expérimentation sur le site granitique de Sanon (Burkina-Faso). IAHS Conference, Rabat, 241, 37-46.

Courtois N., Lachassagne P., Wyns R., Blanchin R., Bougaïré F.D., Somé S., Tapsoba A., 2010. Large-scale mapping of hard-rock aquifer properties applied to Burkina Faso, Ground Water, 48(2), 269-283.

Darko Ph.K., Krásný J., 2007. Regional transmissivity distribution and groundwater potential in hard rock of Ghana. In: Krásný J. & Sharp J.M. (eds.): Groundwater in fractured rocks, IAH Selected Papers, 9, 1-30. Taylor and Francis.

Davis S.N., Turk L.J., 1964. Optimum depth of wells in crystalline rocks. Ground Water, 2(2), 6-11.

de Marsily G., Lavedan G., Boucher M., Fasanino G., 1984. Interpretation of interference tests in a well field using geostatistical techniques to fit the permeability distribution in a reservoir model. In: Verly et al. (ed) Proc. Geostatistics for Natural Resources Characterization. Part 2. D. Reidel Pub. Co.: pp 831–849.

de Marsily G., Delay F., Gonçalves J., Renard Ph., Teles V., Violette S., 2005. Dealing with spatial heterogeneity. Hydrogeology J., 13, 161-183.

Detay M., Poyet P., Emsellem Y., Bernardi A., Aubrac G., 1989. Development of the saprolite reservoir and its state of saturation: influence on the hydrodynamic characteristics of drillings in crystalline basement (in French). Compt. Rend. Acad. Sci. Paris II, 309, 429-436.

Deruyck B., Ehlig-Economides C., Joseph J., 1992. Testing design and analysis. Oil field review. April 1992, 28-45.

Dhakate R., Singh V.S., Negi B.C., Chandra S., Ananda Rao V., 2008. Geomorphological and geophysical approach for locating favourable groundwater zones in granitic terrain, Andhra Pradesh, India. J. of Env. Management, 88, 1373-1383.

Eggler D.H., Larson E.E., Bradley W.C., 1969. Granites, gneisses and the Sherman erosion surface, Southern Laramie Range, Colorado, Wyoming. Am. Journ. Sci. vol.267, pp.510-522.

Ferroud A., Chesnaux R., Rafini S., 2018. Insights on pumping well interpretation from flow dimension analysis: The learnings of a multi-context field database. J. Hydrol. 556, 449–474. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.008.

Fenske P.R., 1984. Unsteady drawdown in the presence of a linear discontinuity. In: Rosenshein, J., Bennett G.D. (Eds.), Groundwater Hydraulics. AGU Water Res. Monogr., 9, 125-145.

Frohlich R.K., Fisher J.J., Summerly E., 1996. Electrical hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: central landfill, Rhode Island, USA. J. Appl. Geophys., 35, 249–259.

- Gringarten A.C., Ramey H.J., 1973. The use of Source and Green's functions in solving unsteady-flow problems in reservoirs. *J. Soc. Petr. Eng.* 13, 285-296. SPE-3818-PA. <http://dx.doi.org/10.2118/3818-PA>
- Gringarten A.C., Ramey H.J., 1974. Unsteady pressure distribution created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration and restricted entry. *J. Soc. Petr. Eng.* 14, 413–426.
- Gringarten A.C., Henry J., Ramey H.J., Raghavan R., 1974. Unsteady state pressure distributions created by a well with a single infinite conductivity vertical fracture. *J. Soc. Petr. Eng.* 14, 347–360.
- Gustafson G., Krásný J., 1994. Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance, *Applied Hydrogeol.* 2, 64-75.
- Haitjema H.M., Mitchell-Bruker S., 2005. Are water tables a subdued replica of the topography? *Ground Water*, 43, 781–786. doi: 10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x
- Hantush M.S., 1961. Aquifer tests on partially penetrating wells. *Proc. Am. Soc. Civil Engin.*, 87, 171-195.
- Houston J.F.T., Lewis R.T., 1988. The Victoria Province drought relief project, II. Borehole yield relationships. *Ground Water*, 26(4), 418-426.
- Howard K.W.F., Hughes M., Charlesworth D.L., Ngobi G., 1992. Hydrogeologic evaluation of fracture permeability in crystalline basement aquifers of Uganda. *Applied Hydrogeol.* 1, 55-65.
- Hunt B., 2005. Flow to vertical and non-vertical wells in leaky aquifers. *ASCE J. Hydrol. Engineering*, 10, 6: 477-484.
- Hunt B., Scott D., 2007. Flow to a well in a two-aquifer system. *ASCE J. Hydrol. Eng.*, doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007), 12, 146–155.
- Hunt B., 2008. Stream depletion for streams and aquifers with finite widths. *ASCE J. Hydrol. Eng.*, 13(2) 80-89.
- Hsieh P.A., 1998. Scale effects in fluid flow through fractured geological media, in *Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology*, ed. G. Sposito, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. 335–353.
- Jones M.J., 1985. The weathered zone aquifers of the basement complex areas of Africa. *Q. J. eng. London*, 18, 35-46.
- Jones P.H., Buford T.B., 1951. Electrical logging applied to groundwater exploration. *Geophysics* 16, 115–139.
- Jourde H., Pistre S., Perrochet P., Drogue C., 2002. Origin of fractional flow dimension to a partially penetrating well in stratified fractured reservoirs: new results based on the study of synthetic fracture networks. *Adv. Water Res.* 25:371–387.
- Kelley W.E., 1977. Geoelectrical sounding for estimating hydraulic conductivity. *Ground Water* 15, 420–425.
- Kolterman C.E., Gorelick S.M., 1996. Heterogeneity in sedimentary deposits: a review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. *Water Resour. Res.* 32, 2617–2658.
- Kool J.B., Parker J.C., van Genuchten M.T., 1987. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models. A Review. *J. of Hydrol.* 91, 255–293.
- Krásný J., 1993. Classification of transmissivity magnitude and variation. *Ground Water*, 31(2), 230-236.

Krásný J., 2000. Geologic factors influencing spatial distribution of hard rock transmissivity. Sililo O et al (eds): Groundwater : Past Achievements and Future Challenges. Proc. 30 IAH Congress, 2000, 187-191, Cape Town, Balkema, Rotterdam.

Krásný J., Sharp J.M., 2007. Hydrogeology of fractured rocks from particular fractures to regional approaches: state-of-the-art and future challenge. In: Krásný J. & Sharp J.M. (eds.): Groundwater in fractured rocks, IAH Selected Papers, 9, 1-30. Taylor and Francis.

Krishnamurthy N.S., Kumar D., Negi B.C., Jain S.C., Ahmed S., 2002. Resistivity investigations for identifying fractured aquifers in a granitic terrain. Proceeding in Inter. Conf. on Hydrology and Watershed Management, 18-20/12/02, Hyderabad.

Krishnamurthy N.S., Kumar D., Rao V.A., Jain S.C., Ahmed S., 2003. Comparison of surface and subsurface geophysical investigations in delineating fracture zones. Current Sciences, 84(9) 1242-1246.

Kuusela-Lahtinen A., Niemi A., Luukkonen A., 2003. Flow dimension as an indicator of hydraulic behaviour in site characterization of fractured rock. Ground Water, 41 (3), 33-341.

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

Lachassagne P., Pinault J.L., Laporte P., 2001b. Radon 222 emanometry: a relevant methodology for water well siting in hard rock aquifers. Water Resour. Res. 37, 3131–3146.

Lachassagne P., Wyns R., 2005. Aquifères de socle : nouveaux concepts. Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. Revue du BRGM Geosciences, 2, sept 2005. 32-37.

Lachassagne P., Wyns R., Dewandel B., 2015. The conceptual model of hard rock aquifers and its practical applications. Extended abstract of « Vingtèmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues ». Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles La Roche sur Yon, France, juin 2015.

Le Borgne T., Bour O., de Dreuzay J.R., Davy P., Touchard F., 2004. Equivalent mean flow models for fractured aquifers: insights from a pumping tests scaling interpretation. Water Resour. Res., 40, W03512, 1-12.

Le Borgne T., Bour O., Paillet F.L., Caudal J.P., 2006. Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in fractured aquifer. J. Hydrol., 328, 347-359.

Ledger E.B., Rowe M.W. 1980. Release of uranium from granitic rocks during in situ weathering and initial erosion (central Texas). Chemical Geology, 29, 227-248.

Leveinen J., Rönkä E., Tikkanen J., Karro E., 1998. Fractional flow dimensions and hydraulic properties of a fracture-zone aquifer, Leppävirta, Finland. Hydrogeology J., 6, 327-340.

Li W., Englert A., Cirpka O.A., Vanderborght J., Vereecken H., 2007. Two-dimensional characterization of hydraulic heterogeneity by multiple pumping tests. Water Resour. Res., 43 W04433, 1-13.

Lods G., Gouze Ph., 2004. WTFM, software for Well Test analysis in Fractured Media combining fractional flow with double porosity and leakance approaches. Computer & Geosciences J. 937-947.

Madrucci V., Taioli F., de Araujo C.C., 2008. Groundwater favourability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, Sao Paulo State, Brazil. J. Hydrol., 357, 153-173.

- Maréchal J.C., Dewandel B., Ahmed S., Lachassagne P., 2007. Hard-rock aquifers characterization prior to modelling at catchment scale: an application to India. In: Krásný J. & Sharp J.M. (eds.): Groundwater in fractured rocks, IAH Selected Papers, 9, 1-30.
- Moench A.F., 1984. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, *Water Resour. Res.*, 20, 831-846.
- Nahon D. B., 1991. Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. Ed. Wiley.
- Nastev M., Savard M., Lapcevic P., Lefebvre R., Martel R., 2004. Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, south-western Quebec, Canada. *Hydrogeology J.*, 12, 257–269.
- Neuman S.P., 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table, *Water Resour. Res.* 8(4),1031-1045.
- Neuman S.P., 1973. Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. *Water Resour. Res.*, 9(4):1006–1021.
- Neuman S.P., 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water Resour. Res.*, 11(2), 329-342.
- Paillet F.L., 1998. Flow modelling and permeability estimations using borehole flow logs in heterogeneous fractured formation. *Water Resour. Res.*, 34 (5), 997-1010.
- Patriarche D., Castro M.C., Goovaerts P., 2005. Estimating regional hydraulic conductivity fields –A comparative study of geostatistical methods. *Math. Geology*, 37 (6), 587-613.
- Pardo-Iguzquiza E., Chica-Olmo M., Garcia-Soldado M.J., Luque-Espinar J.A., 2009. Using semivariogram parameter uncertainty in hydrogeological applications. *Ground Water*, 47 (1), 25-34.
- Perrin J., Ahmed S., Hunkeler D., 2011. The role of geological heterogeneities and piezometric fluctuations on groundwater flow and chemistry in hard-rock, southern India. *Hydrogeology J.* 19 (6), 1189–1201. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-011-0745-y>.
- Pickens J.F., Grisak G.E., Avis J.D., Belanger D.W., Thury M. 1987. Analysis and interpretation of borehole hydraulic tests in deep boreholes; principles model development, and applications. *Water Resources Res.*, 23(7), 1341-1375.
- Pye K., 1986. Mineralogical and textural controls on the weathering of granitoids rocks. *Catena*, 13, 47-57.
- Rafini S., Laroque M., 2012. Numerical modeling of the hydraulic signatures of horizontal and inclined faults. *Hydrogeology J.*, 20: 337–350.
- Ramos G., Carrera J., Gomez S., Minutti C., Camacho R., 2017. A stable computation of logderivatives from noisy drawdown data, *Water Resour. Res.*, 53, 7904–7916, doi:10.1002/2017WR020811.
- Razack M., Lasm T., 2006. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *J. Hydrol.* 325, 164-178.
- Reddy D.V., Sukhija B.S., Nagabhushanam P., Reddy G.K., Kumar D., Lachassagne P., 2006. Soil gas radon emanometry: a tool for delineation of fractures for groundwater in granitic terrains *J. Hydrol.* 329, 1-2, 3, 186-195.
- Reddy D.V., Nagabhushanam P., Sukhija B.S., Reddy A.G.S., 2009. Understanding hydrological processes in a highly stressed granitic aquifer in southern India. *Hydrol. Process.* 23, 1282–1294.

Renard Ph., Glenz D., Mejias M., 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology J.* 17: 589–600.

Robineau B., Join J.L., Beauvais A., Parisot J.C., Savin C., 2007. Geoelectrical imaging of a thick regolith developed on ultramafic rocks: groundwater influence. *Aust. J. Earth Sci.* 54, 773–781.

Rudge J.F., Kelemen P.B., Spiegelman M., 2010. A simple model of reaction-induced cracking applied to serpentinization and carbonation of peridotite. *Earth and Planetary Science Letters*, 291, 215–227.

Sander P., 2007. Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. *Hydrogeol. J.* 15(1), 71-74.

Schicht R.J., Walton W.C., 1961. Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois, Illinois State Water Surv. Rep. Invest., 40, 40 p.

Schlumberger, 2002. Well test interpretation. Rapport technique, SCHLUMBERGER. 122 p.

Sharma, A., Rajamani V., 2000. Weathering of gneissic rocks in the upper reaches of Cauvery river, south India: implications to neotectonics of the region. *Chemical Geology*, vol.166, 203-233.

Spane F.A., Wurstner S.K., 1993. DERIV: a computer program for calculating pressures derivatives for use in hydraulic test analysis. *Ground Water*, 31(5), 814-822.

Tardy Y., 1971. Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs. *Chemical Geology*, 7, 253-271.

Tardy Y., 1993. *Pédrologie des latérites et des sols tropicaux*. Editions Masson, Paris. 459 p.

Tardy Y., 1998. *Dérive des continents, latérites et paléoclimats tropicaux*. Editions BRGM, Orléans. 472 p.

Taylor R., Howard K., 2000. A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda. *Hydrogeol. J.*, 8(3), 279-294.

Thiéry D., 1980. Analysis of a pumping test in a horizontal fracture. Thomas W Doe. Third Invitational Well-Testing Symposium - well testing in low permeability environments, March 1980, Berkeley (California), United States. 26-28.

Theis C.V., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Am. Geoph. Union*, 16, 519-524.

Tsang Y.W., Tsang C.F., Hale F.V., Dverstorp B., 1996. Tracer transport in a stochastic continuum model of fractured media. *Water Resour. Res.*, 32 (10), 3077–3092, doi:10.1029/96WR01397.

Uhl V.W., Sharma G.K., 1978. Results of pumping tests in crystalline-rock aquifers. *Ground Water*, 16(3), 192-203.

Urish D.W., 1981. Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationship in glacial outwash aquifers. *Water Resour. Res.*, 17 (5), 1401–1408.

Vasseur G., Lachassagne P., 2018. Evaluation of the geothermal effects caused by the weathering of crystalline rocks. Offerdinger, U., MacDonald, A. M., Comte, J.-C. & Young, M. E. (eds), *Groundwater in Fractured Bedrock Environments*. Geological Society, London, Special Publications, 479, <https://doi.org/10.1144/SP479.1>

Vouillamoz J.M., Descloitres M., Bernard J., Fourcassie P., Romagny L., 2002. Application of integrated magnetic resonance sounding and resistivity methods for borehole implementation, a case study in Cambodia. *J. Appl. Geophys.* 50, 67–81.

Vouillamoz J.M., Descloitres M., Toe G., Legchenko A., 2005. Characterization of crystalline basement aquifers with MRS: comparison with boreholes and pumping tests data in Burkina Faso. *Near Surface Geophysics* 3 (3), 205–213.

Vouillamoz J.M., Lawson F.M.A., Yalob N., Descloitres M., 2014. The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: The example of Benin. *J. Appl. Geoph.* 107, 16–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.012>.

Walker D.D., Gylling B., Strom A., Selroos J.O., 2001. Hydrogeologic studies for nuclear-waste disposal in Sweden. *Hydrogeol. J.*, 9(5), 419-431.

Warren J.E., Root P.J., 1963. The behaviour of naturally fractured reservoirs. *Soc. Petroleum Eng. J.*, 3, 245-255.

White A.F., Bullen T.D., Schulz M.S., Blum A.E., Huntington T.G., Peters N.E., 2001. Differential rates of feldspar weathering in granitic regoliths. *Geochemica and Cosmochemica Acta*, 65(6), 847-869.

Wright E.P., 1992. The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. *Hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa*, edited by E.P. Wright and W.G. Burgess, pp. 1-27, London Spec. Publ., 66.

Wyns R., Gourry J.-C., Baltassat J.-M., Lebert F., 1999. Caractérisation multiparamètres des horizons de subsurface (0-100 m) en contexte de socle altéré, 2ème Colloque GEOFCAN, edit. BRGM, IRD, UPMC, pp. 105-110, Orléans, 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.

Yeh W.W.G., 1986. Review of parameter estimation procedures in groundwater hydrology: The inverse problem. *Water Resour. Res.*, 22, 95–108.

Zimmerman D.A., de Marsily G., Gotway C.A., Marietta M.G., Axness C.L., Beauheim R.L., Bras R.L., Carrera J., Dagan G., Davies P.B., Gallegos D.P., Galli A., Gomez-Hernandez J.J., Grindrod P., Gutjahr A.L., Kitanidis P.K., Lavenue A.M., McLaughlin D., Neuman S.P., Rama Rao B.S., Ravenne C., Rubin Y., 1998. A comparison of seven geostatistically based inverse approaches to estimate transmissivities for modeling advective transport by groundwater flow. *Water Resour. Res.* 34,(6), 1373–1413.

Annexe 1

Conférences et Proceedings

Nicolas M., Selles A., Bour O., Maréchal J.C., Dewandel B., Bailly-Comte V., Ahmed S., 2018. Impact of the saprolite/bedrock interface geometry on artificial recharge dynamics in crystalline rock aquifers. EGU General Assembly 2018.

Wyns R., Dewandel B., Lachassagne P., 2017. Origin of fracturing in hard-rock aquifers: what are the factors controlling the properties of the fractured layer? Flowpath 2017, pages 14 – 16, Cagliari, Italy, June 2017. IAH Italian Chapter.

Maréchal J.C., Dewandel B., Ladouche B., Fleury P., 2016. What can we learn about karst aquifer heterogeneity from pumping tests? AGU Fall Meeting, San Francisco, United States, Dec. 2016.

Jeanpert J., Adler P., Genthon P., Perotin L.; Sevin B., Dewandel B., Robineau B., Maurizot P., Join J-L, 2016. From boreholes structural and hydraulic conductivity data to fracture system modelling. IAH Conf. sept.2016 Montpellier France.

Jeanpert J., Dewandel B., Maréchal J-C., Join J-L., 2016. Measurement and characterization of hydraulic conductivity of peridotites in New Caledonia. IAH Conf. sept.2016 Montpellier France.

Boisson A., Alazard M., Baïssat M., Selles A., Maréchal J.-C., Perrin J., Dewandel B., Villesseche D., Picot-Colbeaux G., Ahmed S., Kloppmann W., 2016. Managed aquifer recharge in crystalline rock aquifers: assessment, potential and dynamics. Example from south India. IAH Conf. sept.2016 Montpellier France.

Alazar M., Dewandel B., Lachassagne P., Bailly-Comte V., Couëffe R., Grataloup S., Ladouche B., Lanini S., Maréchal J-C., Wyns R., 2016. Hydrogeological conceptual model of a crystalline thermo-mineral carbo-gaseous aquifer driven by a weathering profile and tectonic fractures. IAH Conf. sept.2016 Montpellier France.

Dewandel B., Lachassagne P., Bailly-Comte V., Lanini S., Ladouche B., Maréchal JC., Couëffe R., Barbet C., Grataloup S., Wyns R., 2015. Impact of deep fractures and ancient weathering profiles on compartmentation and functioning of hard rock sparkling natural mineral water hydrosystems. Case study of the Saint-Galmier, France, spring. AQUA 2015 Congress, Rome,

Lachassagne P., Dewandel B., Wyns R., 2015. Le modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle altéré et ses applications pratiques / The hydrogeological conceptual model of weathered Hard Rock Aquifers and its practical applications. 20ièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon 11-13 juin 2015.

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 ? / Origin of Hard Rock Aquifer fracturation: what are the factors that control the properties of the fissured horizon?. 20ièmes journées, CFH, La Roche /Yon.

Maréchal J.C., Dewandel B., Ahmed S., 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 / Use of hydraulic tests at various scales to characterize the properties of the fractured network in the weathered fractured layer of a hard rock aquifer. 20ièmes journées, CFH, La Roche /Yon.

Dewandel B., Lachassagne P., Zaidi F.K., 2015. Interactions entre altération météorique et discontinuités (filons, failles, contacts lithologiques...). Quelles propriétés hydrogéologiques ? / Interactions between weathering and discontinuities (veins, faults, lithological contacts...). Which hydrogeological properties? 20ièmes journées, CFH, La Roche /Yon.

Roques C., Bour O., Aquilina L., Dewandel B., Schroetter J.M., Pauwels H., Marechal J.C., Longuevergne L., Le Borgne T., Labasque T., Vergnaud-Ayraud V., Leray S., Houchreutener R., Lavenant N., Mougin B., Camerlynck C., Durand S., 2015. Le rôle des zones de faille sur l'écoulement des eaux souterraines en socle cristallin / The role of fault-zones on groundwater flow in crystalline basement. 20ièmes journées, CFH, La Roche /Yon.

Baïssset M., Gutierrez A., Mathieu F., Gandolfi J.M., Dewandel B., Boisson A., Bechelen L., 2015. Connaissance de l'aquifère de socle migmatitique de Grand-Santi (Guyane Française) / The Grand-Santi French Guyana migmatitic hard rock aquifer. 20ièmes journées, CFH, La Roche /Yon.

Baltassat J.M., Mathieu F., Ambroise B., Barbet C., Béon O., Dewandel B., Lachassagne P., Maréchal J.C., Norie A., Wyns R., 2015. Méthodologie et résultats d'application de la tomographie électrique de résistivité par courant continu pour l'exploration hydrogéologique des aquifères discontinus en domaine de socle / Methodology and results of electrical tomography for the hydrogeological exploration of discontinuous Hard Rock Aquifers. 20ièmes journées, CFH, La Roche /Yon.

Alazard M., Boisson A., Maréchal J.C., Dewandel B., Perrin J., Petenatti M., Picot-Colbeaux G., Ahmed S., Kloppmann W., 2015. Impact de la structure de recharge artificielle sur la qualité des eaux souterraines dans les aquifères cristallins du sud de l'Inde : cas d'étude du réservoir de Tumulur, bassin versant de Maheswaram / Impact of MAR structure on groundwater quality in south Indian crystalline aquifer: case study of Tumulur tank, Maheshwaram watershed. 20ièmes journées, CFH, La Roche /Yon.

Dewandel B., Lachassagne P., Bailly-Comte V., Lanini S., Ladouche B., Maréchal J.C., Coueffé R., Barbet C., Grataloup S., Wyns R., 2015. Aquifère de socle sous couverture sédimentaire : quelles sont les propriétés hydrodynamiques du profil d'altération ? Exemple du granite de Saint Galmier (France) / Hard rock aquifer below sedimentary cover: what are the hydrodynamic properties of the weathering profile? Case study of the Saint-Galmier, France, granite. POSTER 20ièmes journées, CFH, La Roche /Yon.

Genevier M., Frissant N., Dewandel B., Allan C., Wyns R., Ladouche B., Caballero Y., Coulon A., 2015. Modèle hydrogéologique conceptuel des formations métamorphiques de la Corse alpine à partir d'une approche pluridisciplinaire et multi-échelle / Conceptual hydrogeological model of Alpine Corsica metamorphic formations from a pluridisciplinary, multi-scale approach. POSTER 20ièmes journées, CFH, La Roche /Yon.

Dewandel B., Jeanpert J., Ladouche B., Maréchal J.C., Join J.L., 2015. Une méthodologie pour régionaliser la perméabilité d'un aquifère fracturé à partir de cartes piézométriques détaillées : exemple d'un aquifère péridotitique en Nouvelle-Calédonie / A methodology for regionalizing

permeability field from detailed piezometric map: example of a peridotite aquifer in New Caledonia. POSTER 20th journées, CFH, La Roche /Yon.

Join J.L., Adler P., Bouichet G., Dewandel B., Genthon P., Jeampert J., Ladouche B., Maréchal J.C., Maurizot P., Sevin B., 2015. Hydrogéologie des Péridotites Karstifiées de Nouvelle-Calédonie / Hydrogeology of New Caledonia karstified peridotites. POSTER. 20th journées, CFH, La Roche /Yon.

Le Gal A., Lucassou F., Dewandel B., 2015. Bilan et perspectives des recherches d'eau dans le Morbihan. Site de l'Aff et relations eau de surface/eau souterraine / Assessment and perspectives for groundwater surveys in the Morbihan region (France). The Aff site, and the surface- groundwater relationships. POSTER. 20th journées, CFH, La Roche /Yon.

Boisson A., Guilheneuf N., Perrin J., Bour O., Dewandel B., Alazard M., Ahmed S., Maréchal J.C., 2015. Evolution verticale des paramètres hydrodynamiques dans les aquifères de roches cristallines altérés et fracturés du sud de l'Inde : impact sur la géochimie de l'eau / Vertical evolution of hydrodynamic parameters in weathered and fractured south Indian crystalline-rock aquifers: impact on water geochemistry POSTER. 20th journées, CFH, La Roche /Yon.

Pettenati M., Picot-Colbeaux G., Thiery D., Boisson A., Alazard M., Perrin J., Dewandel B., Maréchal J.C., Ahmed S., Kloppmann W., 2015. Qualité des eaux souterraines des aquifères de socle en contexte semi-aride (Inde du Sud) : outils de modélisation du transport réactif / Hard rock aquifer groundwater quality in semi-arid context (South India): reactive transport modeling tools. POSTER. 20th journées, CFH, La Roche /Yon.

Pauwels H., Negrel P., Dewandel B., Perrin J., Mascré C., Roy S., Ahmed S., 2015. Diagraphies chimiques des eaux souterraines : processus d'accumulation du fluor et structure de l'aquifère granitique / Groundwater hydrochemical logs: fluoride accumulation processes and structure of the granitic aquifer. POSTER. 20th journées, CFH, La Roche /Yon.

Saltel M., Dewandel B., 2014. Caractérisation du dénoyage d'un aquifère, approche au puits, exemple du réservoir de l'Oligocène au Sud de l'agglomération bordelaise. RST 2014, 24th réunion des Sciences de la Terre, Pau, France, Oct. 2014.

Roques C., Aquilina L., Bour O., Dewandel B., 2014. Hydrological and hydrochemical characterization of fault zones in crystalline media: implications for groundwater fluxes. AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, United States, Dec. 2014.

Pettenati M., Picot-Colbeaux G., Thiery D., Boisson A., Alazard M., Perrin J., Dewandel B., Maréchal J.C., Ahmed S., Kloppmann W., Gallardet J., 2014. Water quality evolution during management aquifer recharge (MAR) in indian crystalline basement aquifers; reactive transport modeling in the critical zone. Proc. Earth and Planetary Science, 10, 82-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps.2014.08.016>; Geochemistry of the Earth's surface GES-10.

Henriot A., Blavoux B., Travi Y., P. Lachassagne, O. Béon, Dewandel B., Ladouche B., 2013. Mathematic modeling of complex aquifer: Evian Natural Mineral Water case study considering lumped and distributed models. EGU 2013 Geoph. Res. Abst. Vol. 15, EGU General Assembly 2013., Vienne, Austria, April 2013.

Picot-Colbeaux G., Thiéry D., Pettenati M., Boisson A., Perrin J., Sarah S., Dewandel B., Maréchal J.C., Ahmed S., Kloppmann W., 2013. Modeling managed aquifer recharge capacity of crystalline aquifers in semi-arid context (South India): Implementing natural percolation tank dynamics into MARTHE code. ISMAR8, Beijing, China, October 15-19.

Guihéneuf N., Boisson A., Bour O., Maréchal J.C., Dewandel B., Le Borgne T., Perrin J., Shakeel A., Miossanges M., Dausse A., Chandra S., Wajiddudin M., 2013. Detailed hydraulic model of weathered-fractured hard rock aquifer: implications for groundwater flow at watershed scale. EGU General Assembly 2013, Vienne, Austria, April 2013.

Dewandel B., Maréchal J.C., Bour O., Ladouche B., Ahmed S., Chandra S., Pauwels H., Perrin J., Aulong S., 2012. Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and efficient porosity at watershed scale in crystalline aquifers. Int. Conf. on groundwater in Fractured Rocks, Prague, Czech Republic, 21-24 may 2012.

Dewandel B., Maréchal J.C., Bour O., Ladouche B., Ahmed S., Chandra S., Pauwels H., Perrin J., Aulong S., 2012. Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and efficient porosity at watershed scale in crystalline aquifers. Int. Conf. GDAT2012, Groundwater Dating workshop Rennes - France, October 15-19.

Ahmed S., Guiheneuf N., Boisson A., Marechal J. C., Chandra S., Dewandel B., Perrin J., 2012. Understanding hard rock hydrogeology through an experimental hydrogeological park in south india; site development and investigations on the major role of the fractured zone in crystalline aquifers. Am. Geophys. Union Fall Meeting, USA.

Roques C., Bour O., Aquilina L., Dewandel B., Labasque Th., Longuevergne L., Le Borgne T., Schroetter J.M., Hochreutener R., Leray S., Lavenant N., Vergnaud V., Mougin B., 2012. Characterization of fluxes between deep and surface compartment assessing through groundwater ages. Int. Conf. GDAT2012, Groundwater Dating workshop Rennes - France, October 15-19.

Roques C., Aquilina L., Bour O., Longuevergne L., Dewandel B., Schroetter JM., Le Borgne T., Labasque T., Lavenant N., Hochreutener R., Durand S., Ferre G., Dauteuil O., Vergnaud V., Mougin B., Palvadeau E., Lucassou F., 2012. Hydrodynamic and geochemical characterization of deep hard rock aquifer (Saint-Brice en Coglès, French Brittany). Int. Conf. on groundwater in Fractured Rocks, Prague, Czech Republic, 21-24 may 2012.

Guihéneuf N., Perrin J., Viossanges M., Dausse A., Maréchal J.C., Dewandel B., Bour O., Boisson A., Ahmed S., 2012. Compartmentalization of weathered-fractured crystalline aquifer in semi-arid region: an hydrodynamic approach. Int. Conf. on groundwater in Fractured Rocks, Prague, Czech Republic, 21-24 may 2012.

Vittecoq B., Dewandel B., 2012. Heterogeneity of hydraulic parameters and compartmenting of a volcanic aquifer revealed by long duration pumping tests: example of the Lamentin aquifer -Martinique. GwFR 2012, International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, Prague, Czech Republic, May 2012.

Vittecoq B., Coppo N., Dewandel B., Arnaud L., 2011. New elements toward hydrogeological schemes of Martinique aquifers. 19ème Conférence Géologique de la Caraïbe, p. 24, Le Gosier, Guadeloupe, France, Mars 2011.

Arnaud L., Dewandel B., Vittecoq B., Coppo N., 2011. Prospections hydrogéologiques en milieu volcanique. Etude de cas : Cœur Bouliki, commune de Saint-Joseph, Martinique. 19ème Conférence Géologique de la Caraïbe, p. 25, Le Gosier, Guadeloupe, France, Mars 2011.

Maréchal J.-C., Vouillamoz J.-M., Kumara M.S.M., Dewandel B., 2010. Estimate of fractured aquifer thickness using multiple pumping tests. IAH 2010, Krakow, Sept.2010.

Aulong S., Borne F., Caballero Y., Chaudhuri B., Dazin F., Dewandel B., Dinis L., Galab S., Guerrin J., Himanshu P., Ladouche B., Maire E., Maréchal J.C., Muthusankar G., Perrin J., Prudhvikar Reddy P., Ramesh B. R., Sannier C., Sekhar M., Shakeel A., Vigaud N., 2010. Socio-economic assesment of farmers' vulnerability as water users subject to global change stressors in the hard rock area of southern India. The SHIVA ANR project. International Conference on Integrative Landscape Modelling (LANDMOD 2010), Montpellier, France, Feb. 2010.

Pauwels H., Négrel P., Mascré C., Surendra A., Labasque T., Shakeel A., Dewandel B., 2010. Fluoride in groundwater from hard-rock aquifer: water-rock interaction versus anthropogenic impact. 8th Scientific Assembly of the International Association of Hydrogeological Sciences (IAHS) and 37th Congress of the International Association of Hydrologists (IAH), Hyderabad, India.

Aquilina L., Bour O., Laurencelle M., Labasque T., de Montety V., Le Borgne T., Davy Ph., Pauwels H., Dewandel B., 2010. Outils de connaissance de la ressource en eau dans les milieux de socle – expériences de suivi d'aquifères bretons. 17ième journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'AIH. « La DCE 10 ans après : une dynamique pour la connaissance et la gestion des eaux souterraines. ». Toulouse, 2010.

Dewandel B., Perrin J., Ahmed S., Aulong S., Maréchal J.C., 2010. Développement d'un outil d'aide à la décision pour la gestion de la ressource en eau des aquifères de socle en climat semi-aride. Application à un bassin versant rural d'Inde du sud. Poster au séminaire MINES ParisTech « Modélisation des Hydrosystèmes », 22-23 avril 2010.

Dewandel B., Ladouche B., Le Strat P., Lachassagne P., Barbet C, Vigouroux Ph., 2009. Conceptualisation de la structure et du fonctionnement du gisement hydrominéral carbo-gazeux de la Salvetat. Protection des ressources en eaux et développement local : transposer l'expérience acquises dans le domaine des eaux minérales. 16ième Journées Techniques du Comité Français de l'Association Internationale des Hydrogéologues, 16-17 octobre 2009, Palais Lumière, Evian, France

Dewandel B., Lachassagne P., Zaidi F.-K., Chandra S., 2009. Hydrodynamic role of quartz reef in granitic terrain: an example from south India. Hyderabad 37th IAH International Congress, Sept. 2009.

Dewandel B., Ahmed S., Perrin J., Khan H. H., Nabi A., Lachassagne P., 2009. Sustainable Groundwater Management in Semi-arid Hard-Rock regions. Hyderabad 37th IAH International Congress, Sept. 2009.

Dewandel B., Perrin J., Ahmed S., Chandra S., Kumar D., Lachassagne P., Maréchal J.C., 2009. A new look into hard rock aquifers: inferring the structure of the aquifer. Hyderabad 37th IAH International Congress, Sept. 2009.

Coutois N., Audigane P., Bourguine B., Dewandel B., Dörfli N., Genna A., Ladouche B, Le Strat P., Lions J., 2009 From the understanding of complex aquifers to groundwater resource management: application to carbogaseous mineral groundwater. Hyderabad 37th IAH International Congress, Sept. 2009.

Lachassagne P., Ahmed S., Dewandel B., Courtois N., Marechal J. C., Perrin J., Wyns R., 2009. Recent improvements in the conceptual model of hard rock aquifers and its application to the survey, management, modelling and protection of groundwater. IAHS-AISH Publication, 334, 250-256.

Dewandel B., Vittecoq B., Lachassagne P., Malard A., Puvilland P., 2008. Exploring hydrodynamics of volcanic aquifers through detailed analysis of pumping tests data, in International Symposium in hydrogeology of volcanic rocks - Djibouti - 14-17/12/2008.

Perrin J., Ahmed.S., Dewandel B., Lachassagne P., 2008. Contribution of earth observation to the management of the water resource of hard rock aquifers in semi arid areas, in UNESCO - 15-19/03/2008 - Riyadh - Arabie Saoudite.

Chandra S., Krishnamurthy N. S., Kumar D., Baltassat J. M., Girard J. F., Dewandel B., Rao V.A., Ahmed S., 2008. Joining hydrogeological and geophysical data in an integrated assessment of the groundwater potential in granitic aquifer. 33rd International Geological Congress, Norway.

Courtois N., Audigane P., Bourguine B., Dewandel B., Genna A., Lachassagne P., Ladouche B., Le Strat P., Lions J., 2008. Understanding the functioning of complex aquifers: application to carbogaseous mineral groundwater in Massif Central, France. Hydrothermalisme en domaine continental. Le Bourget-du-Lac – EDYTEM – Aix-les-Bains, 23-24 octobre 2008.

Massuel S., Perrin J., Wajid M., Chandra S., Mascré C., Dewandel B., 2008. Efficiency of artificial groundwater recharge by percolation tanks in a semi-arid hard rock aquifer context, South India.). XIIIth World Water Congress, Montpellier, France, 1-4 sept.

Lachassagne P., Ahmed S., Dewandel B., Courtois N., Lacquement F., Maréchal J-C., Perrin J., Wyns R., 2008. Recent improvements of the geological and hydrogeological conceptual model for hard rock aquifers. From a new hydrogeological conceptual model for hard rock aquifers to enhanced practical applications (survey, management of the water resource, modeling, protection, etc.). XIIIth World Water Congress, Montpellier, France, 1-4 sept.

Dewandel B., Perrin J., Ahmed S., Aulong S., Hrkal Z., Lachassagne P., Samad M., Massuel S., Mukherji A., 2008. Management of the groundwater resources in semi-arid hard rock regions under variable water demand and climatic conditions: development of a Decision Support Tool. Groundwater & Cimate in Africa International Conference, Kampala, Uganda June 24-28.

Lachassagne P., Ahmed S., Dewandel B., Courtois N., Maréchal J-C., Perrin J., Wyns R., 2008. Recent improvements of the geological and hydrogeological conceptual model for hard rock aquifers. Applications for their survey, management, modeling and protection. Groundwater & Cimate in Africa International Conference, Kampala, Uganda June 24-28.

Dewandel B., Gandolfi J-M., Maréchal J-C., Lachassagne P., Zaidi F.K., Ahmed S., Madar S., Massuel S., Hrkal Z., Desai R.K., Raju K., Tirupataiah K., 2007. A Decision Support Tool with Variable Agro-climatic Scenarios for Sustainable Groundwater Management in Semi-arid Hard-Rock areas - Need of a Scientific Tool at an Operational Scale – Proceedings in Third International Groundwater Conference (IGC, 2007) on Water Environment and Agriculture. Feb. 7-10, 2007. Coimbatore, India.

Négrel Ph., Dewandel B., Gandolfi J.M., Dayal A.M., Pauwels H., Roy S., Flehoc C., 2007. Stable isotope hydrogeology of the Maheshwaram watershed (Andhra Pardesh, India). Proceedings in Third International Groundwater Conference (IGC, 2007) on Water Environement and Agriculture. Feb. 7-10, 2007. Coimbatore, India.

Pauwels H., Roy S., Négrel Ph., Ahmed S., Dewandel B., Gandolfi J.M., Atal S., 2007. Genesis and control of fluoride concentrations in groundwater of a small agricultural watershed (Maheswharam, Andhra Pradesh , India). Proceedings in Third International Groundwater

Conference (IGC, 2007) on Water Environment and Agriculture. Feb. 7-10, 2007. Coimbatore, India.

Lachassagne P., Dewandel B., Gandolfi J.-M., Maréchal J.C., Wyns R., 2006. A new geological and hydrogeological conceptual model for hard rock aquifers. Applications for their survey, management modelling and protection. KIGAM International Groundwater Symposium. Jeju (South Korea), 24-26 May, 2006.

Ahmed S., Dewandel B., Gandolfi J.-M., Subrahmanyam K., 2005. A scientific decision tool for groundwater management: Could artificial recharge alone be a sustainable solution? In Salamat, A.R. and Salih A. (eds.) "Management of Artificial Recharge and Rainwater harvesting", Proc. of a workshop in Lahore, Pakistan, April 25 to May 2, 2005, UNESCO publications, p. 87-119.

Maréchal J.C., Dewandel B., Gandolfi J.-M., Ahmed, S., 2004. Groundwater Management in Rural Hard-Rock Areas- A Case Study, published in proceeding of the "Indo-French Seminar on Emerging Technologies for Water and Wastewater Management" 9-12 February, 2004, 155-158.

Zaidi F.K., Atal S., Dewandel B., Ahmed S., 2004. Geological structures for characterizing hard rock aquifers. Italia 2004; 32nd International Geological Congress.

Robain H., Camenlynck C., Baltassat J.-M., Descloitres M., Legtenchenko A., Dewandel B., Krishnamurthy N.S., Rao P., 2004 Groundwater depletion of a heavily irrigated watershed in central India: detailed assessment using MRS and ERT (CEFIPRA Project 2700-W1). AGU Spring Meeting, Montréal, Canada, 17-21 mai 2004. Near-Surface Geophysics session: Evaluation and Management of Water Resources (NS03).

Ahmed S., Maréchal J.C., Subrahmanyam K., Dewandel B., Lachassagne P., 2003. Managing weathered-fractured aquifers in a semi-arid region under monsoon climatic conditions in India, Key note in International Conference on "Groundwater in fractured media", Sept. 15-19, 2003, Prague.

Maréchal J.C., Galéazzi L., Dewandel B., Ahmed S., 2003. Importance of irrigation return flow on the groundwater budget of a rural basin in India, publication in IAHS Red Books as proc. of the International Conference on Hydrology of the Mediterranean and semi-arid regions, Montpellier, 1-4 April 2003.

Maréchal J.C., Galéazzi L., Dewandel B., 2002. Spatial groundwater balance at the watershed scale in a hard-rock aquifer using GIS, Proceedings of the International Conference on "Hydrology and Watershed Management", Hyderabad, 19-20th December 2002.

Maréchal J.C., Galéazzi L., Dewandel B., Ahmed S., 2003. Spatial groundwater budget at the watershed scale in a hard-rock aquifer, Proceeding in International Conference on Hard Rock Hydrogeology in Prague, Sept. 2003.

Boudier F., Dewandel B., Baronnet A., 2003. Relations cristallographiques entre la serpentinisation pénétrative en lizardite et l'orientation préférentielle de l'olivine dans une harzburgite d'Oman. Bulletin de Liaison de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie, 15(34), 39.

Einaudi F., Pezard P., Ildefonse B., Dewandel B., 2001. Electrical properties of gabbros from ODP Hole 1205, southwest Indian ridge. Geological Society of London, september 2001, poster.

Dewandel B., Al-Khamisi S., Lachassagne P., Boudier F., 2001. Hydrogeological properties of the Oman ophiolite. International Conference " Geology of Oman ", Muscat, 16-21 january 2001, présentation orale.

Dewandel B., Boudier F., Kern H., Mainprice, D., 2000. Seismic wave velocity and anisotropy of serpentinized and fractured peridotite in the Oman ophiolite. European Geophysical Society, Nice, 19-23 april 2000, poster.

Dewandel B., Boudier F., Warsi W.K., Kern H., 1999. 3-D organization of serpentine network in serpentinized harzburgite – Implication for seismic properties. European Union of Geosciences 10, Strasbourg, 28 march -1 april 1999, poster.

Boudier F., Warsi W. E. K., Kern H., Dewandel B., Lamoureux G., 1998. Influence of serpentinization on seismic anisotropy of peridotites; preliminary results from Oman ophiolites. EOS, Transactions, American Geophysical Union, USA, 79(17), 349.

Annexe 2

Liste des rapports BRGM

9 Rapports R&D (publics) Agences de l'Eau, ANR, régions, départements, FEDER, Europe-AID, CEFIPRA

Dewandel B., Ladouche B., Lanini S., Bailly-Comte V., Vigouroux P., 2017. Projet de recherche ARK. Amélioration de la connaissance de l'aquifère du bassin d'Aix-Gardanne. BRGM/RP-65884-FR, 177 p.

Join J.L., Adler P., Bouichet G., Dewandel B., Genton P., Jeanpert J., Maréchal J.C., Maurizot P., Sevin B., 2017. Guide pour l'analyse et le suivi des circulations d'eau souterraine en milieu minier, Projet HYPERK – CNRT « Nickel & son environnement », Nouvelle Calédonie, 61 p.

Dewandel B., Ladouche B., Nehlig P., Desprats J.F., Zlotnicki J., 2016. Eléments de caractérisation hydrogéologique et et hydrochimique des formations volcaniques anciennes de l'Aubrac. Projet ALOZ. BRGM/RP-66222-FR, 151 p.

Charlier J.-B., Arnaud L., Ducreux L., Ladouche B., Dewandel B., 2015. CHLOR-EAU-SOL - Caractérisation de la contamination par la chlordécone des eaux et des sols des bassins versants pilotes guadeloupéen et martiniquais. BRGM/RP-64142-FR, 120 p.

Bailly-Comte V., Couëffe R., Dewandel B., Ladouche B., Moulin.M., Vigouroux P., 2015. Projet de recherche ARK – Amélioration de la connaissance de l'aquifère du bassin d'Aix-Gardanne – Données acquises. BRGM/RP-64610-FR, 162 p.

Dewandel B., Tertois L., Vigouroux P., 2014. Projet de recherche ARK. Piézomètres ARK1 et ARK2. Dossier des Ouvrages Exécutés. BRGM/RP-63684-FR, 21 p.

Bauer H., Saint-Marc P., Schroetter J.M., Mougin B., Petelet-Giraud E., Dewandel B., 2012. Projet CINERGY - Connaissance de l'hydrogéologie et de la biomasse profondes du bassin rennais. BRGM/RP-61118-FR, 134 p.

Bauer H., Saint-Marc.P., Schroetter J.-M., Mougin B., Petelet-Giraud E., Dewandel B., 2012. CINERGY : Études menées en 2011. Rapport intermédiaire BRGM/RP-60977-FR, 67 p.

Dewandel B., 2009. Field characterization of the transport properties in crystalline rocks. Hydrogeological properties of the Maheshwaram pilot site. MOHINI project, Projet ANR-07-VULN-O08.

Dewandel B., Ahmed S., Hrkal, Z., Krazni, J., J., Lachassagne, P., Massuel, S., Mukherji, A., Perrin J., Samad, M., Zaidi, F-K, 2007. SUSTWATER Project, Interim Report Scientific Report Year 1. BRGM RP-55821-FR, 117p.

Maréchal J.-C., Ahmed S., Dewandel B., Gandolfi J.M., Hrkal Z., Krazni J., Lachassagne P., Narayana P., 2006. SUSTWATER Project. Inception Report and Kick-Off Workshop Proceedings. BRGM/RP-54780-FR. 65 p.

Baltassat J-M., Krishnamurthy N.S., Girard J-F., Dutta S., Dewandel B., Chandra S., Descloitres M., Legchenko A., Robain H., Ananda Rao V., Ahmed S., 2006. ICFPAR Project 2700-W1, Proton magnetic resonance technique in weathered-fractured aquifers. BRGM report RP-54538, 177 p.

Dewandel B., 2005. Wailapaly boreholes – Drilling and pumping tests report, September 2005. IFCGR report, 40p.

11 Rapports R&D (industriel : Danone, Nestlé)

Dewandel B., Lanini S., Ladouche B., Pettenati M., Desprat J.F., François B., 2018. Système minéral carbo-gazeux de la Salvetat (Hérault) : Modélisation déterministe distribuée du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique – Perspectives pour la gestion et la protection de la ressource en eau minérale naturelle. Rapport final. BRGM/RC-67660-FR, 156 p.

Dewandel B., Bailly-Comte V., Ladouche B., Lanini S., 2014. Système minéral carbo-gazeux de Badoit (Saint-Galmier - Loire) : Amélioration de la connaissance du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique – Perspectives pour la gestion et la protection de la ressource en eau minérale. BRGM/RC-64217-FR, 195 p.

Caballero Y., Dewandel B., Ladouche B., Vigouroux P., 2014. Apport des forages de reconnaissance Proto 1 et Proto 2 à l'amélioration du modèle hydrogéologique conceptuel du site de Quézac. BRGM/RC-63574-FR, 112 p.

Ladouche B., Lanini S., Maréchal J.C., Dewandel B., Petelet-Giraud E., Croiset N., Lassin A., Guerrot C., Charlier J.-B., Bruyère D., 2012. Système minéral carbo-gazeux de la Salvetat (Hérault) : Amélioration de la connaissance et modélisation hydro-géochimique- Perspectives pour la gestion et la protection de la ressource en eau minérale. BRGM/RP-60058-FR, 238 p.

Couëffe R., Dewandel B., Ladouche B., Le.Goff E., Le Strat P., 2012. Implantation de 2 ouvrages de reconnaissance sur le site de Quézac : Propositions. BRGM/RC-61135-FR, 29 p.

Wyns R., Dewandel B., 2011. Réservoirs non conventionnels en domaine de socle fracturé : Synthèse des connaissances du BRGM Première partie : les réseaux de fractures induits par l'altération supergène. BRGM/RP-59196-FR, 127 p.

Lanini S., Ladouche B., Dewandel B., 2010. Conceptualisation et caractérisation de la structure et du fonctionnement hydrogéologique et hydrochimique du site de Petite-Rive (Evian). BRGM/RP-58180-FR, 211 p.

Dewandel B., Ladouche B., Le Strat P., 2010. Système minéral carbo-gazeux de la Salvetat (Hérault) : conceptualisation du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique. Perspectives pour la gestion et la protection de la ressource en eau minérale. BRGM/RP-58247-FR, 247 p.

Courtois N., Dewandel B., Genna. A., Ladouche B., Le Strat P., Lions J., Audigane P., Bourguine B., Cubizolles J., Izac J.L., Le Nindre Y.M., 2009. Développement d'un outil de modélisation et de gestion des ressources en eau minérale, appliqué aux eaux carbo-gazeuses du site de Quézac (Lozère). Phase 2 : modèle géologique et modèle hydrogéologique conceptuel révisés. BRGM/RC-57030-FR, 199 p.

Courtois N., Dewandel B., Bourguine B., Ladouche B., Le Strat P., 2009. Développement d'un outil de modélisation et de gestion des ressources en eau minérale, appliqué aux eaux carbo-gazeuses du site de Quézac (Lozère). Phases 3 et 4 : modélisations hydrogéologiques et géochimiques. BRGM/RC-57289-FR, 98 p.

42 Rapports Service Public (Agences de l'Eau, ONEMA (AFB), ADEME, CEA, régions, départements, DOM-TOM, communes, syndicats...)

Dewandel B., 2018. Méthodes analytiques d'estimation de l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe sur un cours d'eau – Problématique et solutions mathématiques. Rapport final. BRGM/RP-67566-FR, 106 p.

Doney C., Dewandel B., 2017. Etude des relations potentielles entre la nappe des calcaires exploitée par le forage de Nainglet (71) et la nappe de surface du Plio-Quaternaire. Rapport final. BRGM/RP-67118-FR

Bechelen L., Brisset N., Ouerghi Y., Dewandel B., Dias B.R., Joseph B., Cotinet R., 2017. Prospection hydrogéologique du socle fracturé sur Sparouine. Sondages de reconnaissance SR1, SR2 et SR3 et forages de reconnaissance FE1 et FE2. Rapport de fin de travaux. BRGM/RP-66742-FR, 131 p.

Aunay B., Dewandel B., Le Moigne B., Reninger P.A., Dumont M., 2017. Evaluation et actualisation des potentialités hydrogéologiques sur le territoire de la commune de Saint-Benoit. BRGM/RP-66680-FR, 126 p.

Ladouche B., Dewandel B., 2016. Apport de la datation (CFC/SF6/Tritium) à la compréhension du fonctionnement de l'aquifère du Pliocène mobilisé par le forage Rosaret (commune d'Ille-sur-Têt). BRGM/RP-66432-FR, 67 p.

Saltel M., Dewandel B., Bodinniet J., Caperan F., Husson E., Gutierrez T., Hoareau A., 2016. Projet RODÉO (Réseau d'Observation et de prévention du Dénoyage de l'Oligocène) - Phases 2 & 3. BRGM/RP-65339-FR, 93 p.

Dewandel B., Petelet-Giraud E., Lucassou F., Koch F., Vergnaud V., 2015. Etudes complémentaires sur les forages de la vallée de l'Aff : réinterprétation des essais de pompage, analyses physico-chimiques et isotopiques. BRGM/RP-64225-FR, 71 p.

Moulin M., Dewandel B., Ladouche B., Bailly-Comte V., 2015. Amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du secteur de la source d'Entraigues (83). BRGM/RP-65200-FR, 189 p.

Bechelen L., Baisset M., Dewandel B., 2015. Prospection Hydrogéologique du Socle Fracturé à Grand Santi. Forage de reconnaissance FE3 (n°BSS 1199-A8-0014). Rapport de fin de travaux. BRGM/RP-64653-FR, 96 p.

Boisson A., Dewandel B., Bechelen L., 2015. Prospection hydrogéologique du socle fracturé à Grand Santi. Forage de reconnaissance FE5 (n°BSS 1199A80016/FE5). Rapport de fin de travaux. BRGM/RP-64627-FR, 82 p.

Gutierrez A., Bechelen L., Dewandel B., 2015. Prospection hydrogéologique du socle fracturé à Grand Santi. Forage de reconnaissance FE4 (n° BSS 1199A80015/FE4). Rapport de fin de travaux. BRGM/RP-64604-FR, 75 p.

Bechelen L., Dewandel B., 2015. Prospection hydrogéologique du socle fracturé à Grand Santi. Forage de reconnaissance FE2 (n° BSS 1199A80013/FE2). Rapport de fin de travaux. BRGM/RP-64600-FR, 96 p.

Fleury P., Dewandel B., Ladouche B., Le Goff E., Couëffe R., Bitri A., Samyn K., 2015. Evaluation des ressources en eau souterraine des aquifères carbonatés sous couverture sur le secteur de Béziers – Réalisation de 2 forages de reconnaissance. BRGM/RP-64541-FR, 160 p.

Fleury P., Dewandel B., Ladouche B., Delvoye P., Maldan F., 2014. Evaluation des ressources en eau souterraines des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase IV - Investigation sur le forage ROBOL 2. BRGM/RP-64468-FR, 94 p.

Vittecoq B., Dewandel B., 2015. Avis sur le pompage d'essai réalisé en septembre 2013 sur le forage 01474X0069/F2 situé à Courtonne-Les-Deux-Eglises. BRGM/RP-64717-FR, 10 p.

Genevier M., Dewandel B., Frissant N., Bodere G., 2013. Ressource en eau souterraine dans les formations métamorphiques alpines de Corse. Phase 2 : Evaluation et cartographie du potentiel en eau souterraine. BRGM/RP-63031-FR, 75 p.

Genevier M., Frissant N., Allan C., Wyns R., Coulon A., Dewandel B., Ladouche B., Seguin J.J., 2013. Ressource en eau souterraine dans les formations métamorphiques « alpines » de Corse. Phase 1 : Schéma hydrogéologique conceptuel préliminaire. Rapport final BRGM/RP-62985-FR, 196 p.

Heyraud S., Vigouroux P., Dewandel B., 2013. Projet PRESCRIRE - Préserver et protéger les ressources en eau souterraine - Le site du SIAE de Saint-Etienne-de-Fontbellon (07). BRGM/RP-62607-FR, 86 p.

Fleury P., Dewandel B., Maldan F., 2013. Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase IV - Reprise des investigations sur le forage ROBOL. BRGM/RP-62150-FR, 36 p.

Petit V., Dewandel B., Charlier J.-B., Ollivier P., Lucas C., Olivia Z., 2013. Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol. BRGM/RP-61834-FR, 198 p.

Dewandel B., Ladouche B., 2013. Analyse préliminaire des données hydrogéologiques du massif du Koniombo. BRGM/RP-61765-FR, 76 p.

Cabaret O., Gutierrez T., Dewandel B., 2013. Synthèse des données géologiques et hydrogéologiques du Cénomani et du Jurassique basal sous Bordeaux pour la réalisation de forages géothermiques. BRGM/RP-62047-FR, 75 p.

Calvet A., Aunay B., Dewandel B., Ladouche B., 2012. Ressource en eau thermale de la station de Bagnols-les-Bains - Etat des lieux. Rapport final BRGM/RP-61211-FR, 125 p.

Parizot M., Dewandel B., Joseph B., 2012. Finalisation des prospections hydrogéologiques sur les sites du bourg de Cacao et du Mont Mahury - Communes de Roura et de Rémire-Montjoly – Guyane. BRGM/RP-61197-FR, 52 p.

Aunay B., Dewandel B., Ladouche B., Oliva Z., Saussol P., 2012. Identification des modalités d'exploitation des ressources en eaux souterraines du domaine d'altitude de l'Est de La Réunion - Phase 3 (Secteur des Plaines). BRGM/RP-59245-FR, 162 p.

Parizot M., Dewandel B., 2011. Interprétation d'un pompage par paliers de débit et d'un pompage longue durée sur VD4. Charvein. Commune de Mana. BRGM/RP-60417-FR, 15 p.

Petit V., Deguilhem A., Jauffret D., Dewandel B., Ladouche B., Leconte S., 2011. Projet PRESCRIRE - Préserver et protéger les ressources en eau souterraine - Le site de Bourbon-Lancy (71). BRGM/RP-60304-FR, 60 p.

Petit V., Deguilhem A., Jauffret D., Dewandel B., Ladouche B., Leconte S., 2011. Projet PRESCRIRE - Préserver et protéger les ressources en eau souterraine - Le site de Bourbon-Lancy (71). BRGM/RP-60304-FR, 60 p.

Arnaud L., Dewandel B., Leclerc B., Chevrier C., Wiart N., 2010. Suivi géologique et hydrogéologique de 2 forages de reconnaissance sur le site de Coeur Bouliki, commune de Saint-Joseph (Martinique). BRGM/RP-58785-FR, 140 p.

Arnaud L., Leclerc B., Dewandel B., 2010. Forages 1165ZZ0012/F4 et 1165ZZ0013/F5 : travaux et pompages d'essais, Commune de Grand Rivière. Rapport final BRGM/RP-58633-FR. 148 p.

Courtois N., Vigouroux P., Dewandel B., Le Strat P., 2009. Projet 2005-2009 de recherche d'eau minérale carbogazeuse en Lozère (48). BRGM/RP-57644-FR, 46 p.

Fleury P., Ladouche B., Dewandel B., Dorfliger N., Grunenwald G., Izac J.L., Cubizolles J., Le Strat P., 2009. Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase III – Démonstration de la ressource. BRGM/RP-57612-FR, 148 p.

Fleury P., Ladouche B., Dewandel B., Le Strat P., Grunenwald G., Izac J.L., Cubizolles J., 2009. Rapport de fin de travaux du forage de reconnaissance hydrogéologique de Salses-le-Château. BRGM/RP-57606-FR, 53 p.

Brenot A., Nicolas J., Chrétien M., Dewandel B., Courtois N., Castagnac C., Bourguine B., Couëffe R., Martelet G., 2009. Acquisition de connaissances sur la nappe de la molasse du territoire du SAGE de l'Est Lyonnais. BRGM/RP-57474-FR, 165 p.

Dewandel B., Parizot M., Laporte P., Joseph B., 2009. Etude géologique et hydrogéologique de la Montagne du Mahury – Commune de Rémire-Montjoly (Guyane). BRGM/RP-57251-FR, 109 p.

Vittecoq B., Dewandel B., 2009. Pompages d'essais sur le forage 1179ZZ0202 – Commune du Lamentin. : évaluation du débit d'exploitation durable selon plusieurs scénarios d'exploitation. BRGM/RP-57058-FR, 111 p.

Dorfliger N., Courtois N., Dewandel B., Fenart P., Le Strat P., Audigane P., Pistre S., 2009. Synthèse hydrogéologique du centre de Cadarache. En vue d'une modélisation hydrogéologique et du transport à l'échelle du CEN et des sites spécifiques. BRGM/RP-57172-FR, 371 p.

Courtois N., Battaglia-Brunet F., Dewandel B., Noël Y., Pettenati M., Auger P., Beni C., Cubizolles J., Le Strat P., Lions J., 2008. Projet "Serre capteur d'énergie". Application du stockage d'énergie thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraichères. Phase 1: Etude préalable des sites. Rapport d'avancement. Dimensionnement du site du Ctifl de Balandran, et

évaluation des impacts potentiels du stockage thermique en aquifère sur la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines. BRGM/RP-56508-FR, 56 p.

Courtois N., Baltassat J.-M., Battaglia-Brunet F., Dewandel B., Le Strat P., Noël Y., Pettenati M., Auger P., Beni C., Cubizolles J., Izac J.-L., Lions J., Richalet G., 2008. Projet « Serre capteur d'énergie ». Application du stockage d'énergie thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraîchères. Phase 1 : étude préalable des sites. BRGM/RP-56641-FR, 256 p.

Guilbert M., Dewandel B., Lachassagne P., Malard A., 2008. Protection optimisation de la ressource en eau souterraine à Mayotte (Année 4). Valorisation des données d'exploitation des forages de Kwalé 1 (1230-7X-0022) et de Mitsangamouji 2 (1230-6X-0016). BRGM/RP-56438-FR. 100 p.

Vittecoq B., Ollagnier S., Dewandel B., Brugeron A., Gourcy L., 2008. Evaluation des caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de la plaine du Lamentin : pompage d'essai de longue durée sur le forage 1179ZZ0069/LAF1. BRGM/RP-56246-FR, 148 p.

Vittecoq B., Lachassagne P., Mathieu F., Brugeron A., Dewandel B., 2008. Recherche d'eau souterraine à Schoelcher - Fond-Lahaye. BRGM/RP-55728-FR, 244 p.

4 Rapports (industriels)

Dewandel B., Bailly-Comte V., 2016. Système minéral carbo-gazeux. Interprétation des tests hydrauliques et estimation du débit d'exploitation du forage « Frarie » et impact sur le forage « Joyeuse ». BRGM/RC-65932-FR, 39 p.

Dewandel B., 2014. Système minéral carbo-gazeux de Badoit. Forages d'Eau Minérale Naturelle « Violes » et « Primevère ». Test en interférence, interprétations et estimations des débits pour une exploitation simultanée des deux ouvrages. BRGM/RC-63343-FR, 30 p.

Dewandel B., 2013. Système minéral carbo-gazeux de La Salvetat. Interprétation des tests hydrauliques et estimation du débit d'exploitation du forage d'eau minérale naturelle « Le Burquet », BRGM/RC-62708-FR, 24 p.

Dewandel B., 2013. Système minéral carbo-gazeux de Badoit. Interprétation des tests hydrauliques et estimation du débit d'exploitation des forages d'Eau Minérale Naturelle « Hippodrome » et « Violes ». BRGM/RC-62988-FR, 39 p.

7 Rapports expertises – avis techniques (DREAL, DDT, Assurance)

Doney C., Dewandel B., 2018. Avis sur la création d'un forage d'eau agricole sur la commune d'Orbigny (37). BRGM/RP-67575-FR. 21 p.

Doney C., Dewandel B., 2018. Avis sur l'étude d'impact de l'augmentation du prélèvement d'eau au droit du forage de l'EARL IDEE à Nouans-lès-Fontaines (37). BRGM/RP-67614-FR, 24 p.

Arnaud L., Dewandel B., 2016. Avis technique relatif à l'exploitabilité de la nappe alluviale de la Goutte du Chat, commune de Gêrarmet (88). BRGM/RP-65786-FR, 31 p.

Vigouroux P., Dewandel B., 2016. Avis sur le dossier d'autorisation d'exploitation des forages Harmonie et Mélodie à Divonne-les-Bains (01). BRGM/RP-66396-FR, 29 p.

Giuglaris E., Dewandel B., 2014. Programme de tests hydrauliques du puits GRT-2. Expertise Géothermie (SAF ENVIRONNEMENT). BRGM/RP-63733-FR, 18 p.

Dewandel B., Vigouroux P., 2014. Ville de Pézenas (34). Projet thermoludique. Expertise ressource. BRGM/RP-63222-FR, 28 p.

Dewandel B., 2012. Réinterprétation des données du pompage d'essai réalisé en 1994 au puits de l'Arc (Rousset, 13). BRGM/RP-61084-FR, 23 p.

Annexe 3

Tirés à part

Modèle conceptuel des aquifères de socle

Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J.C., Krishnamurthy N.S., 2006. A generalized hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. J. Hydrol., 330, 260-284, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.026.

Modélisation des essais par pompage, solutions analytiques

Dewandel B., Aunay B., Maréchal J.C., Roques C., Bour O., Mougin B., Aquilina L., 2014. Analytical solutions for analysing pumping tests in a sub-vertical and anisotropic fault zone draining shallow aquifers. J. Hydrol., 509, 115–131.

Dewandel B., Lanini S., Lachassagne P., Maréchal J.-C., 2018. A generic analytical solution for modelling pumping tests in wells intersecting fractures. J. Hydrol., 559, 89–99, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.013>.

Méthodes de régionalisation des paramètres hydrodynamiques

Dewandel B., Maréchal J.-C., Bour O., Ladouche B., Ahmed S., Chandra S., Pauwels H., 2012. Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and efficient porosity at watershed scale in crystalline aquifers. J Hydrol., 416-471, 83-97.

Dewandel B., Jeanpert J., B. Ladouche, Join J.-L., Maréchal J.-C., 2017. Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map. J. Hydrol. 550, 118–129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.075>.

