



<http://www.cfh-aih.fr/soclevendee2015>

Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles

Hard-Rock Aquifers: Up-to-date Concepts and Practical Applications

Vingtièmes Journées Techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues

20th Technical Days of the International Association of Hydrogeologists, French Chapter

11-13 juin 2015, Auditorium de l'ICES, la Roche-Sur-Yon, Vendée, France

June 11-13, 2015, ICES auditorium, La Roche-sur-Yon, Vendée, France

Coorganisateur / Co-organizers



Comité Français d'Hydrogéologie.

French Chapter of IAH

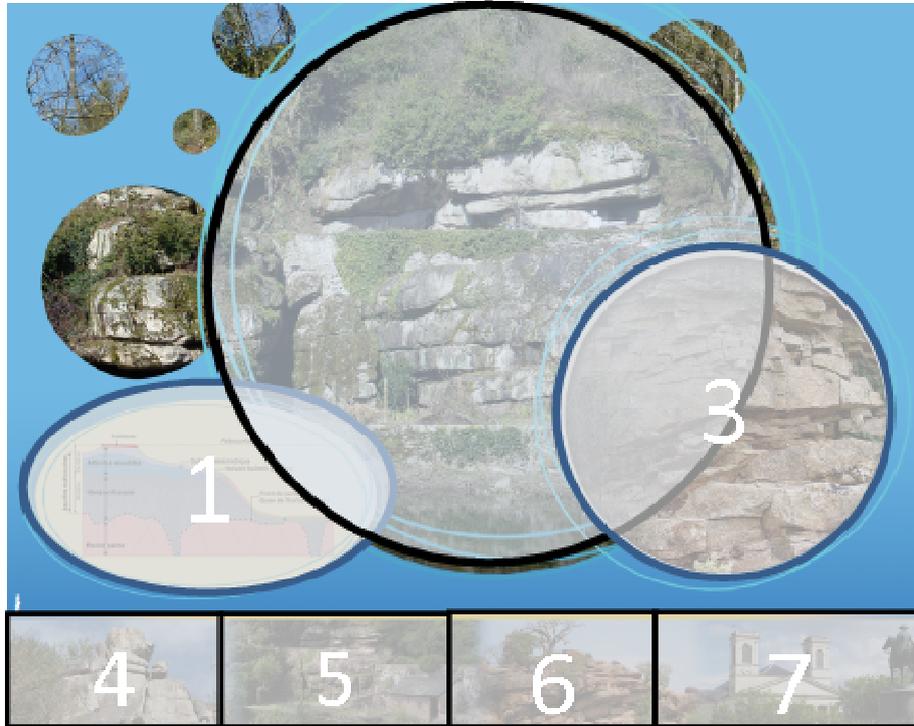


Association des Hydrogéologues de Service Public

Sponsors, parrainages / Sponsors



Légende et crédits des photos de couverture/ Legend and cover photos credits



- 1 - Le modèle conceptuel des aquifères de socle R.Wyns - BRGM
- 2 - L'horizon fissuré, partie moyenne, dans le granite de Mortagne à Mallièvre (Vendée) Photo © R. Wyns
- 3 - L'horizon fissuré, partie sommitale, dans le granite de Mortagne, La Grande Brosse (La Gaubretière, Vendée). Photo © R. Wyns
- 4 - L'horizon fissuré, partie moyenne, dans le granite de Mortagne, Rochers du Manis, Le Longeron (Maine et Loire). Photo © R. Wyns
- 5 - Site de Mallièvre (Vendée). Photo © R. Wyns
- 6 - L'horizon fissuré dans un granite du Burkina Faso. Photo © R. Wyns
- 7 - Place Napoléon, La Roche S/Yon. Photo © L. Chery

- 1 - The conceptual model of hard rock aquifers R.Wyns - BRGM
- 2 - The middle part of fissured zone, Mortagne granite, Mallièvre (Vendée) Photo © R. Wyns
- 3 - The upper part of fissured zone, Mortagne granite, La Grande Brosse (La Gaubretière, Vendée). Photo © R. Wyns
- 4 - The middle part of fissured zone, Mortagne granite, climbing rocks of Le Manis, Le Longeron (Maine et Loire). Photo © R. Wyns
- 5 - Site of Mallièvre (Vendée). Photo R. Wyns
- 6 - The fissured zone in a granite in Burkina Faso. Photo © R. Wyns
- 7 - Place Napoléon, La Roche S/Yon. © L. Chery



Coordinateurs scientifiques du colloque / Scientific coordinators

Patrick Lachassagne, Robert Wyns

Comité d'organisation / Organizing Committee

Laurence CHERY	BRGM Direction D3E - Secrétaire Générales du CFH
Pierre CONIL	BRGM Nantes
Bouchra EL OIFI	Université Bordeaux 1 - Secrétaire adjointe du CFH
Laurence GOURCY	BRGM Direction D3E - trésorière du CFH
Patrick LACHASSAGNE	Danone Waters - Vice-Président du CFH
Frédéric LAPUYADE	SMEGREG - Webmestre du CFH
Pierre MARCHET	Agence de l'Eau Adour-Garonne - Secrétaire adjoint du CFH
Paul Henri MONDAIN	Calligée
Claude ROY	Conseil Général de la Vendée - AHSP
Robert WYNS	BRGM Orléans

Comité Scientifique / Scientific Committee

Bénédicte AUGÉARD	ONEMA Direction de l'Action Scientifique et Technique
Olivier BOUR	Université de Rennes
Jeffrey DAVIES	British Geological Survey, Wallingford
Ghislain DE MARSILY	Université Pierre et Marie Curie, Paris
Benoît DEWANDEL	BRGM Montpellier
Pierre GENTHON	IRD Montpellier
Zbinek HRKAL	Université Charles, Prague
Frédéric HUNEAU	Université de Corse, Corte
Patrick LACHASSAGNE	Danone Waters, Evian les Bains
Jean-Christophe MARECHAL	BRGM Montpellier
Jean-Luc MICHELOT	Université d'Orsay - Paris XI
John SHARP	Chairman of Comm. Hard Rock Hydrogeology, University of Texas
Richard TAYLOR	Imperial College, London
Robert WYNS	BRGM Orléans



Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles **Hard-Rock Aquifers: Up-to-date Concepts and Practical Applications**

Le colloque a deux principaux objectifs :

- proposer un état de l'art des avancées récentes concernant la connaissance de la structure et du fonctionnement hydrogéologique des aquifères des roches plutoniques et métamorphiques (aquifères « de socle »), tant liés aux profils d'altération stratiformes qu'aux discontinuités sub-verticales ;
- présenter les principales applications pratiques qui découlent de ces progrès sur les concepts : cartographie des potentialités en eau souterraine aux différentes échelles, implantation des forages d'eau, gestion et modélisation de la ressource en eau, protection vis-à-vis des pollutions et évaluation de la durabilité des pollutions diffuses, etc.

La problématique des eaux thermales liées à des interactions eau/roche exothermiques sera abordée lors du colloque et de l'excursion sur le terrain.

Le colloque s'articulera autour de communications orales, de sessions posters et de tables rondes ouvertes à la participation des congressistes.

Le troisième jour sera intégralement consacré à une excursion de terrain. Une traduction simultanée français – anglais / anglais - français est prévue.

The conference has two main objectives:

- to propose a state of the art of the recent developments concerning the geological structure and hydrogeological properties and functioning of plutonic and metamorphic rocks aquifers (HRA: Hard Rock Aquifers), related to the stratiform weathering profiles as well as to sub-vertical discontinuities;
- to present the main practical applications derived from these concepts: mapping of groundwater potential at various scales, water well siting, management and modelling of the water resource, groundwater protection against pollutants, evaluating the durability of non-point source contaminations, etc.

The topic of thermal waters related to exothermal water-rock interactions will be addressed during the Conference and the field trip.

The conference will comprise two days of oral presentations; poster sessions and round tables open to all the attendants. The third day will be devoted to a field trip. Official languages of the conference: French and English. English-French and French-English simultaneous translation will be provided.



Nous remercions les sponsors qui nous ont apporté leur soutien financier.



Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles /

Hard-Rock Aquifers: Up-to-date Concepts and Practical Applications

Programme - Schedule

Jeudi 11 juin 2015 / Thursday, 11 June 2015

08h00-09h00	Accueil des participants / Registration
09h00-09h45	Ouverture du colloque / Opening ceremony M. Valentin JOSSE, Vice-Président du Conseil Départemental de Vendée M. Eric RAMBAUD, Président de Vendée Eau M. Michel BAKALOWICZ, Président du Comité Français d'Hydrogéologie de l'AIH
09h45-10h05	Conférence introductive / Introductory talk J.M. Sharp and U. Troeger - Principaux enjeux liés aux aquifères de socle / The importance of Hard Rock Aquifers
10h05-11h05	Session 1 : Modèles conceptuels d'aquifères de socle : processus à l'origine de leur perméabilité/ Hard Rock Aquifers (HRA) conceptual models: processes at their origin Présidents de séance/Session Chairs: Michel Bakalowicz Président du CFH – Antonio Chambel Vice-President IAH for Programme and Scientific Coordination. P. Lachassagne, B. Dewandel et R.Wyns - 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 J. Davies, N. Robins and W. Burgess - Aquifères de socle altérés et fracturés d'Afrique : d'un concept unique à divers modèles d'aquifères / African Weathered and Fractured Basement Aquifers: from Single Concept to Diverse Aquifer Models R. Wyns, B. Dewandel et P. Lachassagne. - 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?
11h05-11h15	Présentation flash des posters de la session 1 / Poster Presentation Session 1
11h15-11h40	<i>Pause/ Coffee break - posters</i>
11h40-12h55	Session 1 suite Présidents de séance/Session Chairs: Jeffrey Davies BGS United Kingdom – Benoit Dewandel BRGM J.C. Maréchal, B. Dewandel et S. Ahmed. - 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

FMA. Lawson, JM Vouillamoz, N. Yalo et M. Descloitres. - Application de la Résonance Magnétique Protonique à la caractérisation des aquifères de socle : exemple du Bénin / Application of Nuclear Magnetic Resonance for the characterization of Hard Rock Aquifers: example of Benin

D. Soro, **M. Koita**, A. Biaou, E. Outombe, Y. Koussoubé, C. Alle, H. Yacouba, R. Guerin, JM. Vouillamoz - Structure et géométrie d'un aquifère de socle sous climat sahélien : cas du site expérimental de Sanon (Centre Nord du Burkina Faso) / Structure and geometry of a hard rock aquifer with sahelian climate: case study of the Sanon experimental site (North Center of Burkina Faso)

A. Baiocchi, W. Dragoni, F. Ltti, SM. Piacentini, **V. Piscopo** - Approche à différentes échelles pour la caractérisation hydrodynamique d'un aquifère de socle : un cas d'étude de métaarénites paléozoïques de Sardaigne (Italie) / Multi-scale approach in hydraulic characterization of Hard Rock Aquifers: a case of study from Paleozoic metarenites of Sardinia (Italy)

A. Rouleau, J. Walter, R. Chesnaux, V. Cloutier, I.D. Clark - Une synthèse de l'hydrogéologie du bouclier canadien avec une focalisation sur la région de Saguenay-Lac-Saint-Jean / An overview of the hydrogeology of the Canadian Shield with emphasis on the Saguenay-Lac-Saint-Jean area.

12h55-13h00 Présentation flash des posters de la session 1/ Poster presentation session 1

13h00-14h30 *Déjeuner/Lunch*

14h30-16h15 **Session 1 suite**

Présidents de séance/Session Chairs: Vincenzo Piscopo Université de Tuscia, Italie - Bénédicte Augeard ONEMA

B. Dewandel, P. Lachassagne, ZF. Kamal - 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?

C. Roques, O. Bour, **L. Aquilina**, B. Dewandel, JM. Schroette, H. Pauwels, JC. Marechal, L. Longuevergne, T. Le Borgne, T. Labasque, V. Vergnaud-Ayraud, S. Leray, R. Houchreutener, N. Lavenant, B. Mougin, C. Camerlynck and S. Durand - 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

A. Chambel et J. Duque - L'importance de la présence de dykes et filons de quartz fracturés pour la recherche d'eau dans les roches métamorphiques argileuses / The importance of the presence of fractured quartz dykes and veins in groundwater prospecting in metamorphic clayish rocks.

K. David, W. Timms, V. David - Approfondissement du modèle conceptuel hydrogéologique des systèmes aquifères fracturés. Kempfield, SA Australia / Refinement of conceptual groundwater model for fractured aquifer system, Kempfield, SA Australia

A. Genter, J. Vidal, **C. Baujard**, E. Dalmais, et J. Schmittbuhl - Perméabilité des roches granitiques profondes : leçons tirées des forages géothermiques profonds dans le graben du Rhin supérieur / Permeability in deep-seated granitic rocks: lessons learnt from deep geothermal boreholes in the Upper Rhine Graben

Alexis Robert - Les calcaires paléozoïques du socle de la Mayenne / The paleozoic limestones from the hard rock Mayenne region

D. Lebon, N. Caze, J. Peltier, Y. Hmae, J.J. Espirat, M. Vandenbeusch - Bilan de 25 années de prospection des aquifères de socle en Nouvelle-Calédonie / Assessment of 25 years of hydrogeological survey in New Caledonia hard rock aquifers

16h15-16h25 Présentation flash des posters de la session 1/ Poster presentation session 1

16h25-16h45 *Pause/Coffee Break posters*

16h45-18h00 **Table ronde sur : « le modèle conceptuel des aquifères de socle » / Round table: "Hard Rock Aquifers hydrogeological conceptual model »**

Animateur/Leader: John Sharp University of Texas, US

Jeffrey Davies, British Geological Survey, Wallingford, UK

Mahamadou Koita, Ouagadougou, Burkina Faso

Jean Christophe Maréchal, BRGM, France

Alain Rouleau, Université de Québec, Canada

Robert Wyns, BRGM, France

Fin de la première journée / End of the first day

18h00-19h00 *Transfert et installation au centre d'hébergement / Transfer and settling into the accommodation centre*

19h00-20h45 **Assemblée générale du CFH / AIH French Chapter general assembly**

20H45-23H45 *Dîner et remise des prix Castany et / Diner and Castany prize*

Conférence/Conference:

Jean-Christophe Maréchal - La dépense gâchée des forages profonds en roche de socle / Hydrogeopsychology: the wasted expense of deep borewells in hard rocks.

Vendredi 12 juin 2015 / Friday, 12 June 2015

08h00-08h30 **Accueil des participants / Registration**

08h30-10h00 **Session 2 : Méthodes d'implantation des forages et de cartographie des potentialités en eau souterraine en contexte de socle : de l'échelle régionale à l'échelle locale / Methods for water well siting and for mapping HRA potentialities: from the regional to the well scale**

Présidents de séance/Session Chairs: Aniekan Edet Université de Calabar, Nigéria - Viviane Borne CALLIGEE

J.M. Vouillamoz, AYA. Tossa, B. Chatenoux, K.A.R. Kpegli - Propriétés des aquifères de socle du Bénin : analyse multi-variables et multi-échelles des paramètres de contrôle / Properties of Benin hard rock aquifers: multivariables and multiscale analysis of controlling parameters.

B. Mougin - Cartographie régionale au 1/250 000 de l'épaisseur des altérites et de l'horizon fissuré utile (projet SILURES Bretagne) / 1/250000 regional mapping of the saprolite and the usefull fissured horizon (SILURES project, Brittany).

J.M. Barrat et A. Gutierrez - Cartographie & Validation des Potentialités en Eaux Souterraines en Domaine de Socle sous Climat Tropical : Exemple du Burundi / Mapping and validation of hard rock groundwater potentialities in tropical climate: Burundi case study.

E. Macé - Programme de recherche en eau souterraine dans le socle vendéen (2003-2013) : synthèse, bilan et optimisations / Groundwater survey programme in the Vendée basement (2003-2013): synthesis, results and optimization.

M. Baïssset, A. Gutierrez, F. Mathieu, JM. Gandolfi, B. Dewandel, A. Boisson, L. Bechelen - Connaissance de l'aquifère de socle migmatitique de Grand-Santi (Guyane Française) / The Grand-Santi French Guyana migmatitic hard rock aquifer.

J.M. Baltassat, F. Mathieu, B. Ambroise, C. Barbet, O. Béon, B. Dewandel, P. Lachassagne, JC. Maréchal, A. Norie, R. Wyns - 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.

10h00-10h05 Présentation flash des posters de la session 2 / Poster presentation session 2

10h05-10h25 *Pause/Coffee Break poster session*

10h25-11h10 **Session 2 suite**

Présidents de séance/Session Chairs: Katarina David, UNSW, Australia – Emmanuel Ledoux Mines Paris-Tech

V. Borne, C. Boulay - Prospections géophysiques adaptées au socle / Geophysical surveys adapted to hard rocks.

M. Ouedraogo, M. Pessel, V. Durand, C. Marlin, I. Savane - Caractérisation hydrogéophysique des aquifères de socle pour l'amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise du bassin versant du Bandama blanc amont (Côte d'Ivoire) / Hydrogeophysical characterization of hard rock aquifers to improve the productivity of village hydraulics wells of the upstream white Badama watershed (Ivory Coast).

D. Allier, B. Mougin, JJ. Seguin - Caractérisation hydrogéologique des entités BDLISA délimitées en zone de socle et transposition de l'information sur la carte hydrogéologique de la France / Hydrogeological characterization of the BDLISA units mapped in hard rocks and transposition of this information on the France hydrogeological map.

11h10-12h10 **Table ronde : « L'implantation des forages en contexte de socle » / Round table: « Water well siting »**

Animateur/Leader : Patrick Lachassagne, Danone Waters, EVIAN-Volvic World, France
Viviane Borne, Calligée, France
Jean-Pierre Faillat, ex. Université de Brest, France
Alexis Gutierrez, BRGM, France
Fabrice Moreau, HYGEO Eau et Environnement, France
Jean-Michel Vouillamoz, IRD, France

12h10-12h15 Présentation flash des posters des sessions 2 et 3 / Poster presentation sessions 2 and 3

12h15-13h15 *Déjeuner/Lunch.*

13h15 -14h45 **Session 3 : Fonctionnement, gestion et modélisation des aquifères de socle / Functioning of HRA. Water resource management and modeling of HRA**

Présidents de séance/Session Chairs: Jean-Christophe Comte Université d'Aberdeen, Ecosse - Hélène Pauwels BRGM

L. Aquilina, V. Vergnaud-Ayraud, T. Labasque, G. Pinay, JR. De Dreuzy, T. Kolbe, B. Abbot, Z. Thomas, L. Ruiz, C. Vautier - Impact du compartiment fracturé sur le temps de réponse des bassins-versants : apports de la datation des eaux / Impact of the fractured compartment on watersheds response time: contribution of water dating.

N. Dickson, **JC. Comte**, JM. Vouillamoz, Y. Koussoube, U. Offerdinger - Contrôles structuraux à grande échelle des propriétés hydrogéologiques et modélisation hydrogéologique du bassin de socle de la haute Oueme (Bénin, Afrique de l'Ouest) / Large-scale structural controls on hydrogeological properties and groundwater modelling in the Upper Oueme basement basin (Benin, West Africa).

J.R. De Dreuzy, J. Marçais, **P. Gueutin**, S. Leray, O. Bour, L. Aquilina, V. Vergnaud-Ayraud - Prédiction des temps de renouvellement dans les aquifères de socle à partir des données de datation des eaux / Prediction of transit time in hard rock aquifers from water dating data.

J. Jaunat, F. Huneau, A. Dupuy, H. Celle-Jeanton, P. Le Coustumer - Investigations hydrochimiques et hydrodynamiques pour préciser les modalités d'écoulements dans les aquifères de socle. Application au massif de l'Ursuya (France, 64) / Hydrochemical and hydrodynamical investigations to characterize flow modes in hard rock aquifers. Application to the Ursuya massif (France).

A. Campoy, **L. Séguis**, M. Boukari, N. Akokponhoue, N. Descloitres, JM. Vouillamoz - Piézométrie d'une zone de socle sous climat soudano-guinéen (Ouémé supérieur, Bénin). Modélisation pluriannuelle et tentative de reconstitution historique depuis 1950 / Piezometry in a hard rock aquifer area with Sudano-Guinean climate (Upper Ouémé, Bénin). Pluriannual modeling and attempts of historical reconstruction since 1950.

V. Durand, V. Léonardi, G. De Marsily, P. Lachassagne - Le modèle conceptuel bicouche des aquifères de socle : validation avec un modèle hydrogéologique déterministe/The two-layer conceptual model of Hard Rock Aquifers: validation with a deterministic hydrogeological model.

14h45-15h00 **Pause/Coffee break**

15h00-16h30 **Session 3 suite**

Présidents de séance/Session Chairs: John M. Sharp Université du Texas, USA - Claude Roy Directeur de l'eau, Conseil Départemental de Vendée

U. Offerdinger, **JC. Comte**, R. Cassidy, J. Caulfield, K. Pilatova, J. Nitsche, C. Wilson, Z. Cai, R. Flynn - Investigations multidisciplinaires au sein d'aquifères de socle faiblement productifs en Irlande : typologie, propriétés et signification pour le cycle de l'eau irlandais / Multidisciplinary investigations of poorly productive hard rock aquifers in Ireland: typologies, properties and significance in the Irish water cycle.

H. Pauwels, A. Boisson, S. Ben Maamar, L. Aquilina - Dénitrification dans les aquifères de socle : Etat des connaissances pour une gestion des eaux souterraines / Denitrification in hard rock aquifers: state of the art pour groundwater management.

M. Alazard, **A.Boisson**, J.C. Maréchal, B. Dewandel, J. Perrin, J. Petenatti, G. Picot-Colbeaux, S. Ahmed, W. Kloppmann- 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.

D. Gabion, N. Baran, B. Bourguine, L. Gourcy, A. Gutierrez, B. Lopez, V. Mardhel, S. Pinson, P. Stollsteiner, N. Surdyk, D. Thiéry, A. Wuilleumier, GEOHYD - Evaluation de l'état des masses d'eau souterraine en domaine de socle / Evaluation of the state of groundwater bodies in hard rock regions.

D. Brou, V. Plagnes - Définition d'une méthodologie de dimensionnement des zones de protection des ouvrages de captages d'eaux souterraines en zone de socle. Cas de la zone test du bassin versant d'Ehania (Sud-est de la Côte d'Ivoire) / Definition of a methodology for groundwater protection zones delineation in hard rocks. Case study of the Ehania watershed (South-Est Ivory Coast).

G. Marjolet, F. Herbreteau, A. Le Gal - Une méthodologie de délimitation des périmètres de protection rapprochés des captages d'eau souterraine en Bretagne / A methodology to delineate water well groundwater protection zones in Brittany.

16h30-17h15

Table ronde : « Qualité et protection des aquifères de socle » / Round table on quality issues and HRA protection

Animateur/Leader: Pierre Marchet, Agence de l'eau Adour-Garonne, France

Luc Aquilina, Université de Rennes, France

Damien Gabion, Agence de l'eau Loire-Bretagne, France

Thierry Gaillard, SAFEGE, France

Gilles Marjolet, ex Conseil Départemental des Côtes d'Armor, France

Paul Henri Mondain, Calligée, France

Hélène Pauwels, BRGM, France

17h15-17h25

Synthèse technique / Technical synthesis

17h25-17h45

Clôture du colloque / Thanks. Closure of the Conference

Transfert vers le centre d'hébergement Transfer to the accommodation centre

SESSIONS POSTERS

Session 1 : Modèles conceptuels d'aquifères de socle : processus à l'origine de leur perméabilité/ Hard Rock Aquifers (HRA) conceptual models: processes at their origin

- P1-1 P. Bessin, F. Guillocheau, C. Robin, H. Bauer, JM. Schroëtter - Les surfaces d'aplanissement du Massif armoricain : relations avec les profils d'altérations, potentiels aquifères de socle / The armorican massif flattening surfaces: relationships with the weathering profiles, potential hard rock aquifers
- P1-2 B. Dewandel, P. Lachassagne, V. Bailly-Comte, S. Lanini, B. Ladouche, JC. Maréchal, R. Coueffé, C. Barbet, S. Grataloup, R. Wyns - 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
- P1-3 A. Edet, CS. Okereke - Cadre hydrogéologique et hydrogéochimique d'un aquifère de socle fracturé altéré, massif du sud de l'Oban (Nigéria) / Hydrogeologic and hydrochemical framework of a weathered basement fractured aquifer, southern Oban massif (Nigeria)
- P1-4 JP. Faillat - Implications de l'organisation et du fonctionnement des aquifères de socle sur leur exploitation / Consequences of the organization and of the functioning of hard rock aquifers on their management
- P1-5 M. Genevier, N. Frissant, B. Dewandel, C. Allanic, R. Wyns, B. Ladouche, Y. Caballero, A. Coulon - 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
- P1-6 A. Gutierrez, JL Lavalade - Typologie des sources de deux districts du Sud-Ouest du Rwanda / Spring typology from two south-west Rwandan districts
- P1-7 A. Laurent et M. Freslon - Les aquifères de socle en Basse-Normandie / Lower Normandy hard rock aquifers
- P1-8 R. Wyns - Les aquifères de socle sont aussi des réservoirs pétroliers / Hard rock aquifers are also oil reservoirs
- P1-9 M. Saplaïroles, JM. Gandolfi, B. Monnot, R. Wyns - Les formations de socle pyrénéennes : potentialité et interactions entre aquifères - Exemples ariégeois / Pyrenean hard rock formations: potentiality and interactions between aquifers - Case studies from Ariège, South-West France
- P1-10 C.F. Moreau, O. Gélé, V. Collin - Examen des potentialités en eau souterraine du socle vendéen semi-profond en vue de l'alimentation en eau potable sur le territoire du Syndicat du Val de Loire (Deux-Sèvres) / Groundwater potentialities of the semi-deep Vendée basement for the potable water supply of the Val-de-Loire syndicate (Deux-Sèvres, France)
- P1-11 R. Wyns - Les fractures polygonales kilométriques des grands massifs granitiques sont-elles des fentes de refroidissement magmatique ? / Are the large granite massives kilometre scale polygonal fractures due to magmatic cooling?
- P1-12 B. Dewandel, J. Jeanpert, B. Ladouche, JC. Maréchal, JL. Join - 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

- P1-13 L. Guillou-Frottier, A. Beauvais, R. Wyns, L. Bailly, T. Augé, AS. Audion - Formation de corrugations hydrothermales lors de l'altération des roches ultramafiques / Formation of hydrothermal corrugations during ultramafic rocks weathering
- P1-14 J.L. Join, P. Adler, G. Bouichet, B. Dewandel, P. Genthon, J. Jeampert, B. Ladouche, JC. Maréchal, P. Maurizot ; B. Sevin - Hydrogéologie des Péridotites Karstifiées de Nouvelle-Calédonie / Hydrogeology of New Caledonia karstified peridotites

Session 2 : Méthodes d'implantation des forages et de cartographie des potentialités en eau souterraine en contexte de socle : de l'échelle régionale à l'échelle locale / Methods for water well siting and for mapping HRA potentialities: from the regional to the well scale

- P2-1 C. Allé, M. Descloitres, JM. Vouillamoz, N. Yalo, M. Lawson, C. Adihou - Caractérisation des aquifères de socle par la résistivité électrique. Pratique de l'implantation des forages et perspectives d'amélioration au Bénin / Hard rock aquifers characterization by electrical resistivity. Practical water well siting and improvement perspectives in Bénin
- P2-2 S. Pasquet, L. Bodet, R. Guérin - Contribution des méthodes sismiques à l'hydrogéophysique : avancées récentes dans le cadre du CRITEX / Contribution of seismic methods to hydrogeophysics: recent advances within CRITEX
- P2-3 KE. Kouadio, AB. Konan-Waidhet - Approche interprétative des données de prospection hydrogéologique et géophysique pour le choix des meilleurs sites de forages en milieu de socle cristallin et métamorphique en Côte d'Ivoire / Interpretation of hydrogeological and geophysical surveys data for siting water wells in crystalline and metamorphic basement in Ivory Coast
- P2-4 A. Ricaud, V. Borne - Investigations mises en œuvre pour la mise en exploitation d'un aquifère de socle à la Guitonnière - Beaufou (85) / Hydrogeological investigations for the exploitation of a hard rock aquifer (la Guitonnière - Beaufou, Vendée, France)

Session 3 : Fonctionnement, gestion et modélisation des aquifères de socle / Functioning of HRA. Water resource management and modeling of HRA

- P3-1 C. Bertrand, A. Vallet, J. Mudry - Caractérisation des écoulements et de l'altération dans les milieux fissurés instables à partir de l'hydrochimie : exemple du versant de socle de Séchillienne (38) / Characterization of the flow and the weathering in the unstable fissured media from hydrochemistry: case study of the Séchillienne, France, hard rock slope
- P3-2 A.F. Bon, JR. Ndam Ngoupayou, A. Ombolo, G. Exodo Mboudou, GE. Ekodeck- Influence de la structure de l'aquifère de socle altéré et fissuré sur son fonctionnement en zone tropicale humide du sud Cameroun / Influence of the structure of the weathered and fissured Hard Rock Aquifer on its functioning in a tropical humid area (South Cameroun)
- P3-3 D. Gabion, B. Mougine, F. Lucassou - SIGES Bretagne : le premier portail de référence pour la gestion des eaux souterraines en zone de socle / Brittany's SIGES: the first reference website for groundwater in hard rocks
- P3-4 V. Kotchoni, JM. Vouillamoz, M. Boukari, C. Adihou - Estimation de la recharge des aquifères de socle au Bénin : approche couplée hydrochimique et piézométrique / Estimating hard rock aquifer recharge in Bénin; coupled hydrochemical and piezometric approach

- P3-5 J.M. Vouillamoz, F.M.A. Lawson, N. Yalo, M. Koita, M. Owor, J. Okullo, C. Tindimugaya, - Quantification des réserves en eau souterraine dans les aquifères de socle africain : comparaison des premiers résultats obtenus au Bénin, au Burkina Faso et en Ouganda / Quantifying groundwater reserves in African hard rock aquifers: comparison of the first results obtained in Bénin, Burkina Faso and Ouganda
- P3-6 A. Le Gal, F. Lucassou, B. Dewandel - 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- ground-water relationships
- P3-7 F. Lucassou, B. Mougin - Elaboration d'indicateurs piézométriques en zone de socle pour la gestion quantitative du département des Côtes d'Armor / Elaboration of piezometric indicators in hard rocks for the quantitative management of the Côtes d'Armor Region (France)
- P3-8 B. Mougin - Calcul des volumes d'eau souterraine sur 12 bassins versants bretons en zone de socle et apports sur les temps moyens de résidence des eaux souterraines / Computation of groundwater volumes of 12 Brittany hard rock catchments and contribution over the mean groundwater residence time
- P3-9 S. Pinson, D. Allier, V. Mardhel, P. Stollsteiner, A. Wuilleumier - Contribution des eaux souterraines aux écoulements des masses d'eau de surface du Bassin Loire-Bretagne : application au socle / Groundwater contribution to the surface water bodies of the Loire-Bretagne Basin: application to hard rocks
- P3-10 Th. K. Yao, O. Fouché, MS. Oga - Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines dans le bassin versant du Sassandra (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) / Chemical and isotopic characterization of groundwater in the Sassandra watershed (South-West Ivory Coast)
- P3-11 A.Boisson, N. Guilheneuf, J. Perrin, O. Bour, B. Dewandel, M. Alazard, S. Ahmed, JC. Maréchal - 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
- P3-12 M. Pettenati, G. Picot-Colbeaux, D. Thiery, A. Boisson, M. Alazard, J. Perrin, B. Dewandel, JC. Maréchal, S. Ahmed, W. Kloppmann - 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
- P3-13 H. Pauwels, P. Negrel, B. Dewandel, J. Perrin, C. Mascré, S. Roy, S. Ahmed - 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
- P3-14 O. Gaillard, T. Gaillard - Approche hydrodynamique des aquifères fissurés en zone de socle par la méthode de la fracture unique et du MPE : cas d'études dans le massif armoricain et conséquence pour la protection des captages / Hydrodynamical approach of fissured aquifers in hard rocks by the unique fracture and equivalent porous medium: case study in the Armorican massif and consequences for water well protection
- P3-15 O. Bour, T. Le Borgne, MV. Klepikova, T. Read, JS. Selker, VF. Bense, H. Le Lay, R. Hochreutener, N. Lavenant - Utilisation de la chaleur comme traceur des eaux souterraines pour caractériser le fonctionnement des aquifères de socle à différentes échelles / Use of Heat as a Groundwater Tracer to Characterize the Functioning of Hard-Rock Aquifers at Different Scales
- P3-16 O. Bour, T. Le Borgne, L. Longuevergne, N. Lavenant, JR. De Dreuzy, J. Schuite, F. Boudin, T. Labasque, V. Vergnaud-Ayraud, L. Aquilina, P. Davy - Intérêts des observatoires hydrogéologiques pour tester des méthodes de terrain innovantes : résultats obtenus sur le site de Ploemeur (Bretagne) / Interests of hydrogeological observatories for testing innovative field methods: insights from the Ploemeur site (Brittany)

- P3-17 G. Ferhat, P. Genthon, AH. Mouhouyoudine, J. Kinderer, B. Hector, S. Yameogo - Mesures gravimétriques pour les aquifères de socle Africains / Gravimetric measurements for African hard rock aquifers
- P3-18 S. Rafini, R. Chesnaux - Caractérisation des hétérogénéités des aquifères de socle en utilisant les séquences de diagnostic de dimension d'écoulement/Characterizing heterogeneities in bedrock aquifers using flow dimension diagnostic sequences
- P3-19 J. Schuite, L. Longuevergne, O. Bour, N. Lavenant, F. Boudin - Evaluation des propriétés des aquifères de socle fracturé par le suivi des déformations de surface : apport de capteurs de déformations / Assessing properties of fractured hardrock aquifers from surface deformation monitoring: insight from tiltmeters
- P3-20 C. Roy, C. Le Guern - Etude du potentiel en géothermie profonde dans le massif granitique de Moutiers-les-Mauxfaits / Study of the deep geothermal potential of the Moutiers-les-Mauxfaits granite, France.
- P3-21 R. Wyns, L. Guillou-Frottier, JP. Girard, A. Beauvais, P. Blanc - Réactions exothermiques dans les profils latéritiques sur granites : conséquences sur les eaux souterraines / Exothermic reactions in granites lateritic profiles: Consequences on Groundwater
- P3-22 O. Saighi, A. Filly - Potentialités aquifères du socle du Hoggar, Algérie/ Groundwater Resource Potential in the basement of Hoggar Region

TABLE DES MATIERES/TABLE OF CONTENTS

	Page
Conférence introductive/Introductive Talk	19
Session 1 : Communications orales / Oral Communications	29
Session 1 : Posters	47
Session 2 : Communications orales / Oral Communications	63
Session 2 : Posters	75
Session 3 : Communications orales / Oral Communications	81
Session 3 : Posters	95
Liste des auteurs/ Authors List	127

CONFERENCE INTRODUCTIVE

INTRODUCTORY TALK

The Importance of Hard-Rock Aquifers

Principaux enjeux liés aux aquifères de socle

John M. Sharp¹, Jr. and Uwe Troeger²

1 - Department of Geological Sciences, The University of Texas, Austin, Texas 78712 USA,
jmsharp@jsg.utexas.edu

2 - Lehrstuhl fuer Hydrogeologie, Technical University of Berlin, D-10587, Berlin, Germany
uwe.troeger@tu-berlin.de

I. INTRODUCTION

Hard-rock aquifers are those rock systems and, in some cases, the overlying regolith, that occur primarily in fractured crystalline (igneous and metamorphic) rocks. In hard-rock aquifers, fractures provide the major (or sole) permeability and, in many cases, porosity and storativity. Thus, the term hard-rock aquifer can also be extended to include rocks with similar hydro-geologic characteristics, such as indurated low-porosity clastic rocks, many (unkarstified) carbonates, and welded tuffs. Hard-rock aquifer systems may also include the weathered upper portions of these rocks. Igneous and metamorphic rocks crop out much of the Earth's land surface (estimates vary from 20 -30%, depending upon how the overlying sediments are considered). Thus, in much of the world, hard-rock aquifers are the only sources of groundwater. These areas include the Precambrian shields of all the continents, the cores of major mountain ranges, and any areas of past or current igneous activity. In other areas they may be an important secondary source of water.

However, hard rocks also form the hydrogeologic basement. Although often exposed at the Earth's surface, they are commonly overlain by sedimentary rocks or by unconsolidated deposits that are from weathering in place (saprolites) or transported by water (fluvial, deltaic, marine or lacustrine processes), wind (aeolian processes), ice (glacial or nival processes) and mass wasting processes. Compared to hard-rock aquifers, these overlying sedimentary units have been studied much more intensively because they tend to be more productive - they are typically more porous and permeable as well as being shallower and more easily drillable. Sedimentary basins can be up to 10s of kilometres thick. This hard-rock hydrogeological basement is not impermeable; it connects with sedimentary basins on overlying sediments; and its waters interact with overlying units as depicted on Figure 1.

II. HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS

Hard-rock aquifer systems in igneous and metamorphic rocks do have some common characteristics, including their vertical zonation and critical hydrogeological features. Fractured media are typically divided into 4 classes (Figure 2): A. Purely fractured media in which all groundwater storage and permeability are in the fractures; B. Fractured formations in which fractures provide the permeability, but there is storage in both the fractures and the matrix; C. Double porosity media in which flow and storage in both the fractures and the matrix must be considered; and D. Heterogeneous media that systems where the fractures are filled with clastic materials. As noted in Figure 2, fracture skins (Robinson et al., 1998) with different properties are possible in all classes.

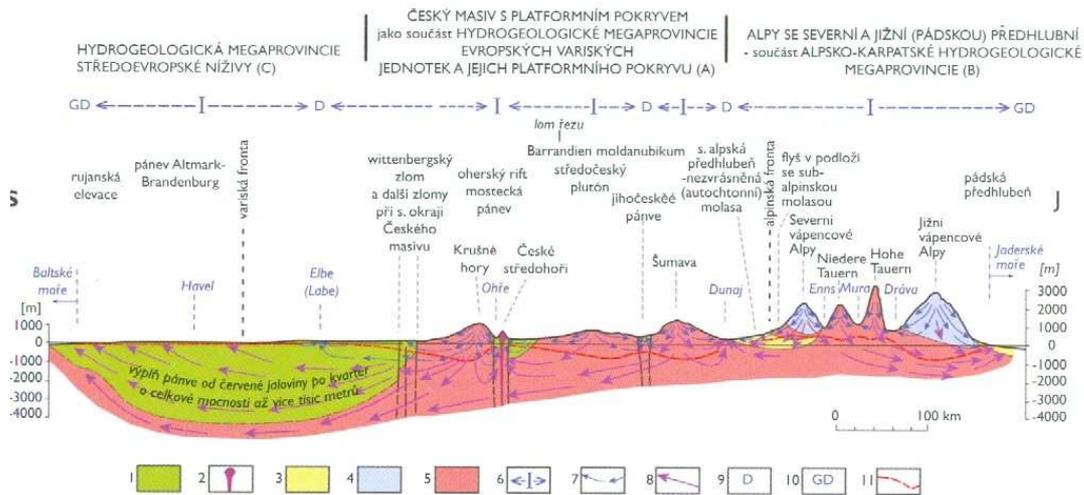


Figure 1 - Geological-hydrogeological cross-section from the Baltic Sea (left) and the Adriatic Sea (right) (Krasny et al., 2014, Plate 3). Inferred flow systems are depicted. In the key: 1 and 3, (green and yellow units) are sedimentary rocks; 2 are Cenozoic volcanic rocks; 4 are Alpine, chiefly carbonate, rocks; 5 are igneous and metamorphic hard rocks; 6-10 represent flow systems (local to regional), and 11 represents the depth of deep saline groundwater.

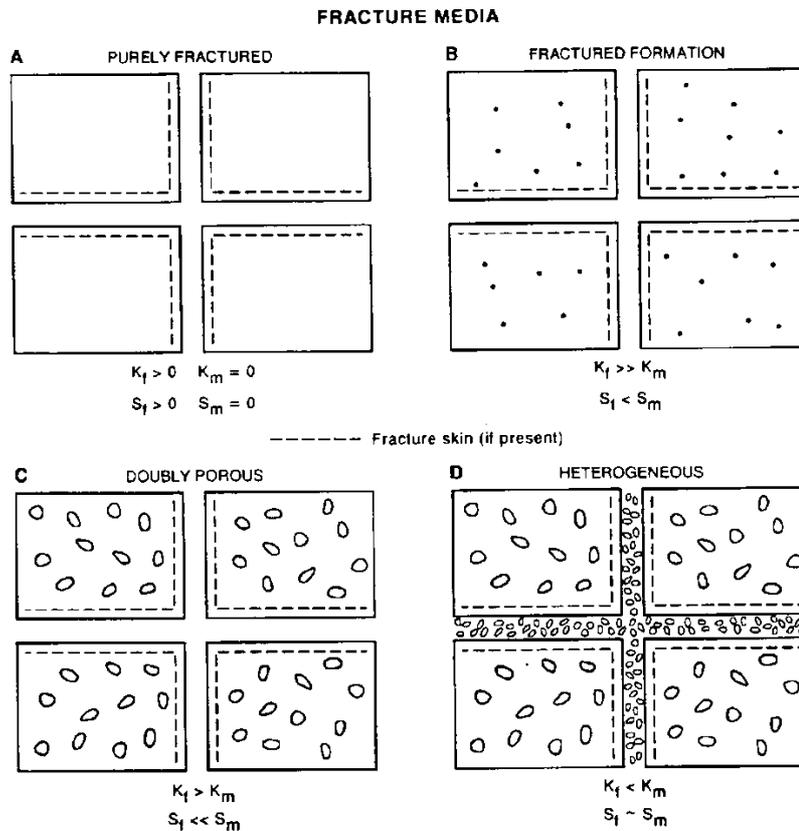


Figure 2 - Types of fractured media (after Sharp, 1993). Types A and B characterize hard-rock aquifers. K_f , K_m and S_f , S_m are the hydraulic conductivities and storativities of the fracture and matrix systems, respectively.

II.1 Critical hydrogeological features.

In fractured systems, the permeability (and transmissivity) is controlled by a number of geological factors. These include:

- The fracture sets - Fractures commonly occur in subparallel sets. The rule of thumb is that there are generally 3 sets of fractures – one subhorizontal and two subvertical that intersect at a high angle, often approaching 90°.
- Fracture orientations – The strike, dip, and general shape of the fractures (i.e., planar, curved, branching, etc.)
- Fracture spacing / density - How close together are the fractures / what is the spacing pattern / how many fractures are there in a given area or volume?
- Apertures – The distance between the fracture surfaces. The general hydraulic conductivity of a single planar fracture is perhaps best estimated by the geometric mean aperture at normal hydraulic gradients (Sharp et al., 2014)
- Roughness and asperity – These are how the fracture surfaces vary from a plane. A number of empirical equations have been presented showing how roughness affects the permeability.
- Connectivity - Fractures can communicate freely hydraulically or diffusely or they can terminate and be closed.
- The effects of varying earth stresses or stress histories on the above properties.

Thus, characterizing hard-rock aquifers is a challenge. Measuring the above parameters can be exceedingly difficult and translating their properties from one scale to another or spatially at the same scale is equally difficult. There are, however, some generalizations that can be made. First, it is found that in hard-rock aquifers the fracture permeability decreases with depth and a “rule of thumb” is the chance of finding sufficient permeability in wells deeper than 100 m are small. Second, wells sited in valleys are more productive where the valleys were formed in response to a greater density of fractures. Third, at a large enough scale, permeabilities may approach a maximum (Clauser, 1992), provided that the most transmissive features are sampled adequately. Fourth, it is difficult to predict where and how quickly solutes, such as contaminants, are transported. This is sometimes referred to as Black's Law – “When dealing with fractured systems, contaminants appear at places not predicted and faster than predicted.”

Five broad ranges of transmissivity as determined from pumping tests were compiled by Krasny and colleagues (Figure 3). These data show that the transmissivity of hard rock aquifers varies by orders of magnitude, but transmissivity is not always low.

II.2. Vertical zonation

Finally there are some generalizations that can be made about the vertical distribution of hydrogeologic properties in hard-rock aquifers. Krasny and Sharp (2007), Krasny et al. (2014), and Deere and Patton (1971, who presented from the standpoint of site characterizations for construction) generalize the vertical zonation in hard rocks; these are summarized in Table 1. The hard-rock environment can be divided into three vertical zones:

Upper / local (weathered) zone formed by regolith, colluvium, talus, etc. often juxtaposed with mostly Quaternary alluvial, fluvial, glacial, or lacustrine deposits. The thickness is commonly several meters but can be much thicker. Where sufficiently thick and permeable, these strata can provide productive local aquifers and the underlying hard-rock systems are not exploited. Where these strata are thin, of limited permeability, or polluted, the underlying hard-rock aquifers are needed.

In many areas the overlying sediments are not transported materials, but develop from weathering *in situ*. Table 1 (following the references) and Figure 4 show this scenario. The uppermost layers are subdivided into the standard soil horizons with B soil horizon (zone Ib) typically having the lowest permeability. This zone includes the weathered rock zone where, in residual soils, the greatest permeability is typically in the transition zone (zone IIa) from saprolite (the C horizon) to partly weathered rock. In some systems, the weathered rock zone and the underlying fractured bedrock can be considered a single aquifer system. Figure 4 characterizes residual soils on metamorphic and plutonic rocks.

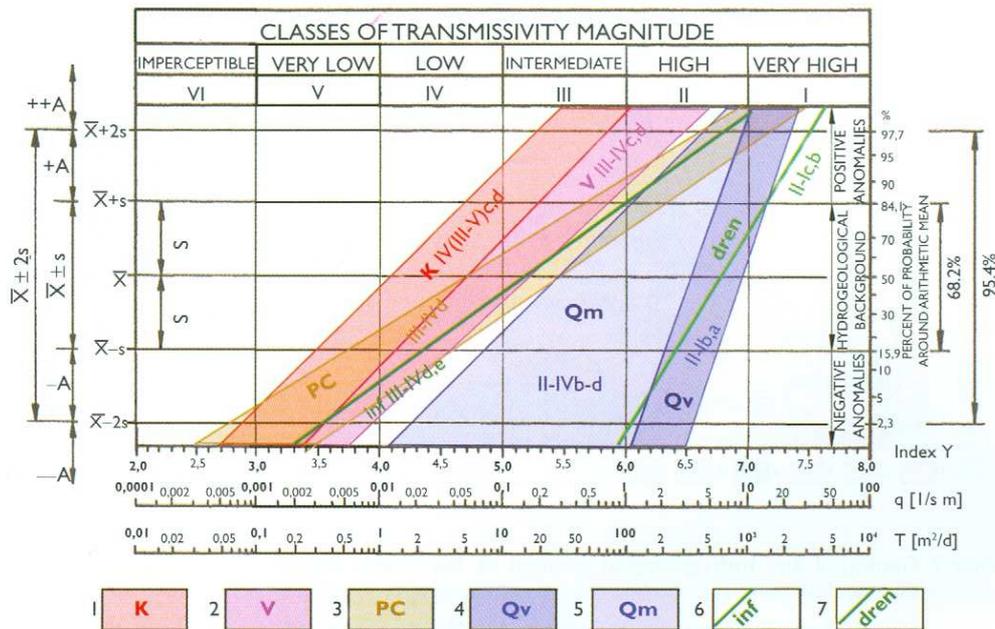


Figure 3 - Typical transmissivity ranges for selected hydrogeological environments (Krasny et al., 2012, 2014). 1 - near surface hard rocks; 2 – crystalline limestones, etc.; 3 – shallow Paleozoic/Mesozoic basin sedimentary rocks; 4 and 5 – Quaternary alluvial deposits along main water course (4) and smaller water courses and terrace deposits (5); 6 and 7 – shallow Cretaceous sandstones on summits and slopes (6, the recharge zones) and in valleys (7, the discharge zones).

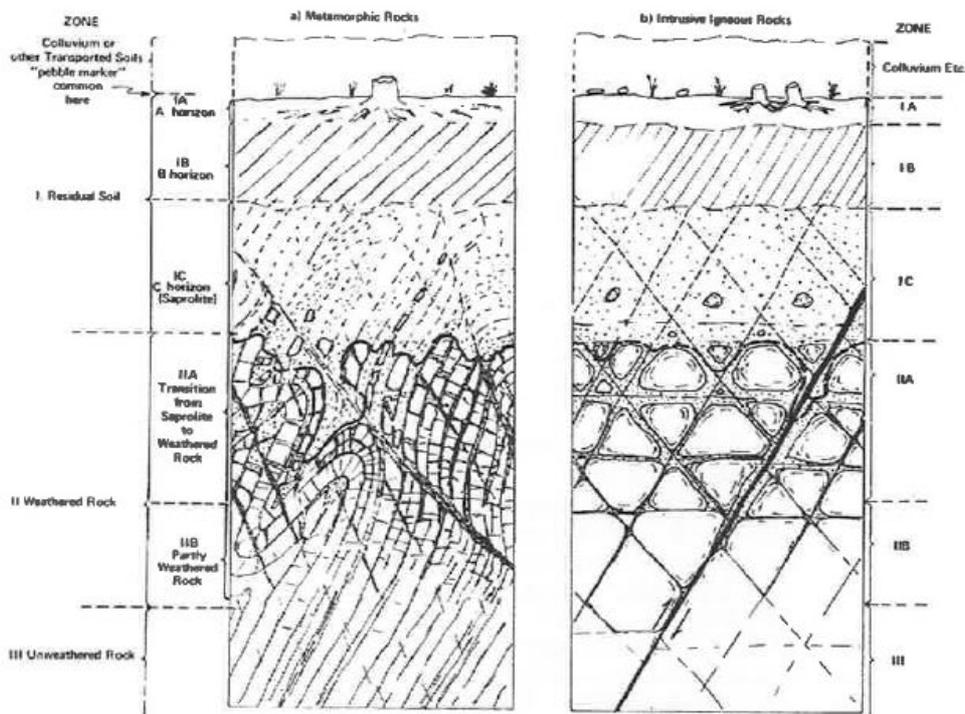


Figure 4 - Typical sections of weathering zones in residual soils developed on metamorphic (left) and plutonic rock (right) (Deere and Patton, 1971).

Middle / regional zone represents fractured bedrock to depths of tens or hundreds of meters. Fracture openings depend mostly on exogenous geologic processes so that permeability generally decreases with depth.

Lower / retarded zone where permeable fracture and fault zones are relatively scarce. Deep fractures can sometimes act as isolated, more or less individual hydraulic bodies. On a regional scale, these may form interconnected networks enabling extended and deep, regional and continental/ global groundwater flow to reach great depths. Deep drill holes have on occasionally encountered highly permeable fracture zones. Under suitable structural conditions or in specific rocks (e.g., granites, quartzite, etc.), mineral and thermal waters may ascend along deep faults.

The boundaries of these zones depend on natural conditions, but human effects (under-ground mining, excavation, blasting, etc.) can also be important. In addition, changes in global climatic zones (e.g., permafrost), topography, and other regionally prevailing features can also affect hard-rock hydrogeology.

III. THE FUTURE OF HARD-ROCK AQUIFERS

Understanding the characteristics and sustainability of hard-rock aquifers and indeed hard-rock hydrogeologic systems is challenging. First over much of the globe, including Africa and the Indian subcontinent, hard-rock aquifers are a major water resource and populations in these areas are growing rapidly. In other areas, hard-rocks are a secondary source for domestic and local water supplies that

become critical during times of droughts, infrastructure failures (e.g. water pipeline breaks), or when other water resources become polluted or overdrawn.

In addition, crystalline rock systems are commonly encountered in construction and tunneling and are sites of mining activities or of potential geothermal energy production. They are also being examined as sites for storage of high-level radioactive (or other) wastes because of the limited permeability at depth. Methods and challenges for characterizing hard-rock aquifers and their sustainability apply in these situations as well.

Mining and geotechnical engineering. Many metal (e.g. lead, zinc, gold, silver, etc.), and uranium deposits occur in hard rocks. Underground mining and tunneling commonly requires dewatering of hard-rock systems (Hokr et al., 2014).

Oil and gas production. There are numerous examples of hydrocarbon in crystalline rock reservoirs (Petford and McCaffrey, 2003) and the process of hydraulic fracturing is allowing for exploitation of rock previously considered impermeable by which we are essentially creating fractured formations (category B in Figure 2).

Geothermal energy. The future of hot, dry rock or engineered geothermal systems depends upon analysis of deep fractured systems, either natural or created, that we need to harness the Earth's deep thermal energy (Evans et al., 1999). The difficulty of studying flow in fracture systems at depth where higher temperatures occur is the main obstacle. In Germany (Groß Schönebeck), the results of stimulation of fractures have shown that only 10% of the theoretical calculated flow could be achieved (Zimmerman et al., 2008). If this resource can be tapped economically, it will be immense with few contamination issues.

Waste disposal. In Sweden (e.g., Neretnieks, 2013) and Switzerland (e.g., Smith et al., 2001), hard-rocks have been investigated as repositories for high-level radioactive waste and higher than expected flows of water through fractures have been encountered. In Montalba (South-France), a test site for radioactive waste disposal of France in granites was closed after the observation of intensive groundwater flow has showed high permeability in these hard rocks (Pistre, 1992).

Understanding fractured hard-rock systems has great challenges, but they are important and may become increasingly so for their use as a water resource, as hosts for mineral and hydrocarbon production, geothermal energy, and waste disposal. Amongst the chief challenges in their utilization are:

- how to characterize and parameterize these very inhomogeneous systems,
- upscaling from lab to well field or from well field to regional scales, and
- finding appropriate data to validate or test numerical models of fracture system hydrogeology and transport of solutes, colloids, and heat transport.

The findings of this conference can provide insights into these unique fractured rock systems and, hopefully, guidelines for future productive research.

IV. ACKNOWLEDGEMENT

We appreciate John Mather's reading of an earlier version of this manuscript. Acknowledgement is made to the Geology Foundation of The University of Texas through the David P. Carlton Professorship for support of this research.

V. REFERENCES

Deere, D.U., Patton, F.D. (1971) Slope stability in residual soils: *Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, American Society of Civil Engineers.*

Evans, K.F., Cornet, F.H. Hashida, T., Hayashi, I., Matsuki, K., Wallroth, T. (1999) Stress and rock mechanics issues of relevance to HDR/HWR engineered geothermal systems: Review of developments during the last 15 years: *Geothermics*, v. 28, no. 4-5.

Hokr, M., Balvin, A., Skarydova, I, Ralek, P. (2014) Tunnel inflow in granite – fitting field observations with hybrid model of discrete fractures and continuum: *in Fractured Rock Hydrogeology, International Association of Hydrogeologists Selected Papers*, v. 20, Taylor & Francis, London, Ch. 15..

Krasny, J., Cislérova. M., Curda, S., Datel, J., Grmela, A., Hrkál, Z., Kriz, H., Marszałek, H., Santrucek, J., Silar, J. (2012) Regional Hydrogeology of Groundwaters and Mineral Waters (in Czech, with English summary): *Ceska Geologická Sluzba, Prague.*

Krasny, J., Sharp, J.M., Jr. (eds.) (2000, Groundwater in Fractured Rocks: *International Association of Hydrogeologists Selected Papers*, v. 9, Taylor & Francis, London.

Krasny, J., Sharp, J.M., Jr., Troeger, U. (2014) IAH Commission on Hardrock Hydrogeology (HyRoC): Past and present activities, future possibilities: *in Fractured Rock Hydrogeology, International Association of Hydrogeologists Selected Papers*, v. 20, Taylor & Francis, London, Ch. 1.

[Neretnieks, I.](#) (2013) Some aspects of release and transport of gases in deep granitic rocks; possible implications for nuclear waste repositories: *Hydrogeology Journal*, v. 21, no. 8.

Petford, N., and McCaffrey, K.J.W. (eds.) (2003) Hydrocarbons in Crystalline Rocks: *Geological Society, London, Special Publication 214.*

Pistre, S. (1992) Structure fissurale et modélisation hydrodynamique: cas d'un reservoir aquifer en milieu granitique: *Mémoire pour docteur ès sciences à l'Université de Montpellier.*

Robinson, N.I., Sharp, J.M., Jr., Kreisel, I. (1998) Contaminant transport in sets of parallel finite fractures with fracture skins: *Jour. Contaminant Hydrology*, v. 31.

Sharp, J.M., Jr. (1993) Fractured aquifers/reservoirs: Approaches, problems, and opportunities: *in Hydrogeology of Hard Rocks (Banks, D., and Banks, S., eds.), Memoires, 24th Congress, International Association of Hydrogeologists, Oslo, Norway*, v. 24, part 1.

Sharp, J.M., Jr. (ed.) (2014) Fractured Rock Hydrogeology: *International Association of Hydrogeologists Selected Papers*, v. 20, Taylor & Francis, London.

Sharp, J.M., Jr., Al-Johar, M.M., Slotke, D.T., Ketcham, R.A. (2014,) Prediction of fracture roughness and other hydraulic properties: is upscaling possible? *in Fractured Rock Hydrogeology, International Association of Hydrogeologists Selected Papers*, v. 20, Taylor & Francis, London, Ch. 10.

[Smith, P. A.](#) , [Alexander, W. R.](#) , [Kickmaier, W.](#) , [Ota, K.](#) [Frieg, B.](#) [McKinley, I. G.](#) (2001) Development and testing of radionuclide transport models for fractured rock; examples from the Nagra/JNC Radionuclide Migration Programme in the Grimsel Test Site, Switzerland: *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 47, no. 2-4.

Zimmermann, G., Reinicke, A., Brandt, W., Blöcher, G., Milsch, H., Holl, H.-G., Moeck, I., Schulte, T., Saadat, A., Huenges, E. (2008): Results of stimulation treatments at the geothermal research wells in Groß Schönebeck/Germany, (SGP-TR-184), 33rd *Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, USA.*

HYDRODYNAMICAL ZONE (Krasny & Sharp)	ZONE (Deere & Patton)	Depth [m]	Description	Relative permeability	TDS (g/L)	Hydrochemical facies	RQD % (NX core)	Core recovery % (NX core)
Upper / local (intensive / shallow)	I Residual soil	Ia O, A, & E soil horizons Ib B soil horizon	top soil, roots, organic matter; zone of leaching and eluviation	low to medium			-	0
			clay-enriched; accumulations of Fe, Al, & Si; may be cemented; no relict structures	LOW			0	
	II Weathered rock	IIc C horizon (saprolite)	relict rock structures retained; fines are silts grading to sands; < 10% core stones; often micaceous	medium	0.0x to 0.x	Ca (-Mg)- HCO ₃ (-SO ₄)	0 or not applicable	generally 0-10%
Middle / regional (intermediate)	III Unweathered rock	IIa transition IIb partly weathered	Water losses high during drilling; relict rock structures retained; fines are commonly fine to coarse sand; grus; 10-95% core stones; spheroidal weathering common	HIGH			variable, 0-50%	variable, 10-90%
			joints stained to altered, some alteration of feldspars and micas	medium to high			generally 50-75%	generally > 90%
	Lower / retarded (slow, deep, negligible down to stagnant)	III Unweathered rock	hundreds of m	No iron stains along joints, little weathering of feldspars and micas	low to medium	up to several g/L	Na-HCO ₃ (-SO ₄)	> 75% generally > 90%
Global (often insignificant)	many thousands of m			low	up to several hundreds g/L	Na-Cl		
				very low		Na(-Ca)-Cl		

Table 1 - Vertical zonation in hard-rock aquifer systems and associated residual soils (after Krasny and Sharp, 2007, 2014, and Deere and Patton, 1971). RQD stands for rock quality designation is the total length of rock core pieces greater than 10 cm in length, divided by the total core barrel length. The NX diamond drill core diameter is about 55 mm.

SESSION 1

**MODELES CONCEPTUELS D'AQUIFERES DE SOCLE :
PROCESSUS A L'ORIGINE DE LEUR PERMEABILITE**

**HARD ROCK AQUIFERS (HRA) CONCEPTUAL MODELS:
PROCESSES AT THEIR ORIGIN**

***COMMUNICATIONS ORALES
ORAL COMMUNICATIONS***

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

Patrick Lachassagne ⁽¹⁾, Benoit Dewandel ⁽²⁾, Robert Wyns ⁽³⁾

(1) Danone Waters, Evian-Volvic-World, BP 87, 74500 Evian-les-Bains Cedex
patrick.lachassagne@danone.com

(2) BRGM, D3E/NRE

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

La plupart des roches de socle (roches plutoniques et métamorphiques) sont ou ont été exposées à des processus d'altération supergène, notamment au sein des vastes zones de socle affleurant d'Afrique, d'Inde, d'Amérique du Nord et du Sud, d'Australie, d'Europe, etc.. Ces processus géologiques requièrent notamment de l'eau météorique, du temps (plusieurs Ma à dizaines de Ma) et un taux d'érosion inférieur à la vitesse de propagation de l'altération. Il en résulte des profils d'altération d'épaisseur pluridécamétrique (lorsqu'ils ne sont pas partiellement érodés).

La perméabilité des roches de socle résulte de ces processus d'altération. Les zones perméables sont situées principalement au sein de l'horizon fracturé, stratiforme, subhorizontal, de quelques dizaines de mètres d'épaisseur, qui se trouve immédiatement sous les altérites meubles (allotérites et isaltérites). Dans une moindre mesure, les zones perméables se trouvent aussi, sur quelques mètres de largeur, à la périphérie fracturée et altérée parallèle aux discontinuités géologiques préexistantes (contacts lithologiques, joints, dykes, filons, etc., souvent subverticaux) ; ces discontinuités constituant des lieux privilégiés de propagation de l'altération vers le bas.

Il résulte de la configuration la plus générale (horizon fracturé stratiforme), un aquifère composite dont l'horizon fracturé assure la fonction transmissive et les altérites meubles sus-jacentes, avec des porosités efficaces pouvant dépasser 5%, la fonction capacitive. Ce modèle conceptuel unifie les données et observations géologiques et hydrogéologiques sur les milieux de socle réalisées principalement depuis le milieu du XXe siècle. Son utilisation a ouvert de larges perspectives appliquées et a amélioré la fiabilité de l'hydrogéologie et de la géologie appliquées au sein des roches de socle : cartographie des potentialités hydrogéologiques, depuis l'échelle d'un pays jusqu'à celle du forage, modélisation des champs de perméabilité et de porosité efficace, implantation des forages d'eau, interprétation des données géophysiques, gestion quantitative et modélisation de la ressource en eau, évaluation du débit d'exhaure des tunnels, carrières et tranchées en région de socle, vulnérabilité, périmètres de protection et transfert des contaminants, implantation de centres d'enfouissement technique, etc..

African Weathered and Fractured Basement Aquifers: From Single Concept to Diverse Aquifer Models

Jeffrey Davies^(1, 2), Nick Robins⁽¹⁾ and Willy Burgess⁽²⁾

(1) British Geological Survey, Maclean Building, Wallingford, U.K. , (2) University College,
London. E-mail: jdav@bgs.ac.uk

Understanding groundwater occurrence in Crystalline Basement aquifers within Anglophone areas of sub-saharan Africa is based upon a conceptual model produced by hydrogeologists developing groundwater in Tanzania, Malawi and Zimbabwe between 1975 and 1985. Within Francophone Sub-Saharan Africa, similar concepts were produced by geomorphologists and hydrogeologists at that time in Madagascar, Cote D'Ivoire and Senegal. This model has, since the 1980s, been applied to development of groundwater in Crystalline Basement throughout sub-Saharan Africa by those providing regional assessments of groundwater resources using limited data.

The basic conceptual model comprises a series of layers defined by degree of weathering applied broadly to weathered hard rock sequences. However, the variation in hydrogeological environments observed throughout the region questions its continued viability. Recent detailed hydrogeological surveys show that the lithological nature and hydraulic features of these layers are dependent on:

- Present and past climatic environments – variations in rainfall, temperature, evaporation
- Base rock lithology – mineral composition, grain-size, degree of metamorphism
- Rates of mineral breakdown and dissolution due to chemical and biological action
- Local tectonics – cratonic stability, rifting, folding, continental break-up and drift
- Geomorphological modes of erosion/deflation due to drainage and oscillation of sea levels during glacial events
- Age of weathering and how the nature of weathering has been affected by major changes in atmospheric composition as caused by large volcanic eruptions and lava outpourings.

Here we review the concepts of weathering and their control upon aquifer through-flow, storage, and recharge using data from studies of lithologically and environmentally diverse sites. These case studies have been undertaken in Ghana (Proterozoic metasediments), Tanzania (Greenschist belt), Malawi (granites and granitic gneisses), and Zimbabwe (Zimbabwe craton and Schist Belt). The results are compared with weathered Basement profiles in Malaysia, Brazil, Jersey and elsewhere in Africa.

Variations noted from detailed studies are used to challenge the application of the standard conceptual model to regional aquifers. An alternate matrix model, based on a soil and lithology framework, is proposed for assessment of groundwater resources in crystalline Basement.

Origine de la fracturation des aquifères de socle : quels sont les facteurs qui contrôlent les propriétés de l'horizon fissuré

Robert Wyns⁽¹⁾, Benoît Dewandel⁽²⁾ et Patrick Lachassagne⁽³⁾

(1) BRGM, ISTO, UMR 7327, Orléans ; (2) BRGM, D3E, Montpellier ; (3) Danone Waters, Evian-Volvic-World, BP 87, 74500 Evian-les-Bains Cedex

r.wyns@brgm.fr

La fracturation qui est à l'origine de la perméabilité des aquifères de socle présente une géométrie principalement planaire dans les roches plutoniques et irrégulière dans les roches métamorphiques paradérivées et/ou plissées ; dans les deux cas, la densité de fractures et leur interconnexion décroît du sommet du bedrock vers le bas, formant l'horizon fissuré. L'origine de cette fracturation, notamment celle, planaire, des granitoïdes, a été débattue depuis très longtemps : elle a été interprétée de diverses manières, notamment comme résultant de la contraction du magma au cours de son refroidissement, ou bien comme résultant d'une « décompression » liée à l'érosion des terrains sus-jacents ou aussi comme résultant d'une fracturation tectonique.

Nous développerons l'argumentaire permettant d'écarter ces explications. Les études pétrographiques réalisées dans les granites afin de comprendre les mécanismes de fissuration planaire de l'horizon fissuré montrent que les phyllites, et notamment la biotite, augmentent de volume d'environ 40 % au cours du stade précoce de l'altération (transformation de la biotite en vermiculite ou en chlorite, l'épaisseur des feuillets passant de 10 à 14 Å). Cette transformation minérale se faisant dans une roche rigide, il s'ensuit une augmentation des contraintes : dans le plan horizontal, les contraintes s'accumulent au fur et à mesure des transformations minérales ; dans le plan vertical, les contraintes augmentent jusqu'à ce que la charge lithostatique soit compensée, puis ne varient plus. Les conditions de rupture sont atteintes lorsque la différence d'intensité entre la contrainte principale (horizontale) et la contrainte minimale (verticale) atteint la limite élastique de la roche.

Les observations accumulées depuis plus de 15 ans montrent qu'outre la biotite, les pyroxènes et l'olivine sont les minéraux primaires dont l'altération conduit à la création d'un réseau de fissures. Par ailleurs les observations réalisées sur l'horizon fissuré de profils anciens (profil antétriasique des Vosges et du Morvan) montrent que celui-ci a souvent été largement colmaté par des minéralisations hydrothermales (barytine, fluorine, dolomite, ankérite, calcite, quartz...) au cours de l'enfouissement du profil.

Les principaux facteurs contrôlant les propriétés aquifères des roches de socle sont donc :

- la minéralogie (abondance de la biotite, des pyroxènes ou de l'olivine) ;
- la texture et la structure (taille des minéraux gonflants et leur orientation) ;
- le degré de colmatage du réseau de fissures, lié à l'histoire géologique : les profils dont la porosité est restée ouverte sont les profils qui n'ont pas été enfouis sous des épaisseurs importantes de sédiments.

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

Jean-Christophe Maréchal, Benoît Dewandel ⁽¹⁾, Shakeel Ahmed ⁽²⁾

(1) BRGM, Water Environment & Ecotechnologies Division; jc.marechal@brgm.fr

(2) NGRI, National Geophysical Research Institute, Indo-French Center
for Groundwater Research

Les propriétés hydrodynamiques de la couche fracturée altérée d'un aquifère de socle (terrain granitique du sud de l'Inde) ont été caractérisées en utilisant des essais hydrauliques à différentes échelles. L'interprétation de nombreux essais slug conduit à caractériser la distribution statistique des perméabilités locales dans les puits. La réalisation de profils au micro-moulinet pendant des essais d'injection permet d'obtenir la distribution verticale de zones de fractures conductives et de leurs perméabilités. Il apparaît que la partie la plus conductive de la couche fracturée altérée s'étend jusqu'à une profondeur limite de 35 mètres. La répartition de la porosité de drainage entre blocs (90 %) et fractures (10 %) est déterminée grâce à l'interprétation d'essais de pompage au moyen d'un modèle à double porosité. L'application des solutions analytiques d'anisotropie et de fracture horizontale unique aux données d'essais de pompage permet de déterminer, respectivement, le degré d'anisotropie de perméabilité ($K_r/K_z = 10$) et le rayon (4 à 16 mètres) des fractures horizontales conductives traversées par les forages [1]. Deux réseaux de fractures d'échelles différentes sont identifiés : le réseau de fractures primaire (PFN – Primary Fracture Network), qui affecte la matrice à une échelle décimétrique en contribuant à augmenter la perméabilité et les capacités d'emmagasinement des blocs, et un réseau de fractures secondaire (SFN – Secondary Fracture Network) qui affecte les blocs à l'échelle du forage. Le SFN est composé de deux ensembles de fractures. Le principal ensemble de fractures horizontales est responsable de la perméabilité sub-horizontale de la couche fracturée altérée. Un second ensemble de fractures sub-verticales, moins perméables, assure la connectivité de l'aquifère à l'échelle du forage. La bonne connectivité des réseaux de fractures est démontrée par les solutions analytiques de flux à dimension fractionnaire. L'absence d'effet d'échelle dans la zone d'étude suggère que la conductivité hydraulique à l'échelle du forage est latéralement homogène. Finalement, l'analyse et la synthèse des propriétés hydrodynamiques permettent de proposer un modèle hydrodynamique global de la couche fracturée altérée. De nombreux indicateurs géologiques et hydrogéologiques suggèrent qu'un processus d'altération continu et latéralement homogène est responsable de la perméabilité rencontrée dans l'aquifère. Ces résultats confirment le rôle majeur joué par l'altération sur les paramètres hydrodynamiques dans la partie superficielle des aquifères de socle [2].

Références bibliographiques :

[1] Maréchal, J.C., Wyns, R., Lachassagne, P., Subrahmanyam, K. & Touchard, F. 2003: Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération, *C.R. Geoscience*, 335, 5, 451-460.

[2] Maréchal, J.C., Dewandel, B. & Subrahmanyam, K. 2004 : Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer, *Water Resources Research*, 40, 11, W11508, doi:10.1029/2004WR003137.

Application de la Résonance Magnétique Protonique à la caractérisation des aquifères de socle: exemple du Bénin

Lawson, F.M.A.⁽¹⁾; Vouillamoz, J.M.⁽²⁾; Yalo, N.⁽³⁾; Descloitres, M.⁽⁴⁾

(1) Université d'Abomey-Calavi/Institut National de l'Eau, lawson.amen@yahoo.fr

(2) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, jean-michel.vouillamoz@ird.fr

(3) Université d'Abomey-Calavi/Institut National de l'Eau, yalonicaise@yahoo.fr

(4) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, marc.descloitres@ird.fr

Comparée aux autres méthodes géophysiques, la Résonance Magnétique Protonique (RMP) est unique pour l'hydrogéologue car elle mesure un signal émis par les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau. Peu d'études antérieures ont cherché à quantifier la porosité de drainage (S_y) et la transmissivité (T) des aquifères de socle à partir des signaux RMP; de plus les relations proposées n'étaient pas convaincantes notamment pour estimer S_y [1]. Cette étude vise à mieux quantifier les relations entre S_y , les réserves calculées comme le produit de S_y par l'épaisseur saturée, et T pour différentes roches de socle. Pour ce faire, nous avons mis en place six sites expérimentaux répartis dans différentes unités géologiques de socle du Bénin. Sur chacun de ces sites, nous avons réalisés des sondages RMP et des essais de pompage de 72h. Nous avons dans un premier temps interprété les sondages RMP avec un modèle mono-couche, puis avec un modèle bi-couche sensé mieux représenter le modèle hydrogéologique conceptuel des aquifères de socle [2].

Les interprétations mono-couche des sondages RMP indiquent [3] que (1) S_y peut être estimé à partir des résultats RMP avec une différence moyenne inférieure à 20% par rapport aux valeurs de S_y obtenues par essai de pompage, (2) T estimée à partir des résultats de sondages RMP présente une différence moyenne de 70% avec T obtenue par interprétation des essais de pompage. Nous avons également trouvé que les interprétations bi-couche ne permettent pas de réduire les différences entre les propriétés obtenues par pompage et celles calculées à partir des paramètres RMP. Aussi, nous avons conduit une modélisation numérique pour rechercher les conditions dans lesquels les modèles RMP bi-couche permettraient d'améliorer la caractérisation des aquifères. Nous avons trouvé que l'estimation des propriétés intégratrices (T et réserve) est toujours meilleure en mono-couche lorsque ces propriétés sont contrôlées par les altérites (i.e. altérites épaisses et conductivité hydraulique élevée), cas général au Bénin.

Références bibliographiques :

[1] 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, 205–213.

[2] 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. doi:10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x

[3] Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2014. The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: The example of Benin. *Journal of Applied Geophysics* 107, 16–24. doi:10.1016/j.jappgeo.2014.05.012

Structure et géométrie d'un aquifère de socle sous climat sahélien : cas du site expérimental de Sanon (Centre Nord du Burkina Faso)

Soro D.D.^(1,2), **Koita M.**⁽¹⁾, **Biaou A.**⁽¹⁾, **Outombe E.**⁽¹⁾, **Koussoubé Y.**⁽³⁾,
Allé C.⁽⁴⁾, **Yacouba H.**⁽¹⁾, **Guérin R.**⁽²⁾, **Vouillamoz, J.M.**⁽⁵⁾

- (1) Fondation 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso, dimitri.soro@2ie-edu.org; mahamadou.koita@2ie-edu.org; angelbert.biaou@2ie-edu.org; eli.outoumbe@yahoo.fr; hama.yacouba@2ie-edu.org ;
- (2) Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, France, roger.guerin@upmc.fr ;
- (3) Université de Ouagadougou, Burkina Faso, youssof.koussoubé@gmail.com
- (4) Université d'Abomey-Calavi, Bénin, christian.alle@ird.fr
- (5) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP-UMR LTHE, jean-michel.vouillamoz@ird.fr

Cette étude vise à mieux comprendre la géométrie et la structure de l'aquifère de Sanon localisé au Burkina Faso en milieu de socle caractérisé par un panchwork de migmatite, de gneiss, de granite et de roche verte.

Dans un premier temps, la démarche méthodologique suivie a consisté à décrire à l'échelle du forage le profil d'altération et les bancotières réalisées au niveau des versants cuirassés. Dans un second temps, le profil d'altération (profil en long) de crête en crête a été décrit à partir des profils de résistivité électrique 2D qui recourent le maximum des structures linéamentaires proposés par les travaux antérieurs [1]. Les dispositifs choisis pour la mise en œuvre des mesures géophysiques ont été préalablement définis à l'aide de modélisations synthétiques. Les différentes données issues de ces investigations hydrogéophysiques ont finalement été inversées, classifiées et validées avec les lithologies.

Le profil d'altération proposé sous climat sahélien présente du sommet à la base la même structuration verticale avec quatre couches distinctes que celui proposé sous climat humique. Le profil d'altération est plus épais au niveau de la vallée centrale et moins épais au niveau des versants et des interfluves recouverts de cuirasses latéritiques. Ceci s'expliquerait par le fait que la vallée centrale constitue une zone d'infiltration préférentielle marquée par une convergence de failles alors que les versants très endurcis favoriseraient le ruissellement. La présence d'un dôme piézométrique serait le corollaire de cette structuration. Ce type d'évolution géométrique du profil d'altération est tout à fait l'opposé du schéma observé en zone tropicale humide où le profil d'altération est plus épais vers les points hauts et généralement protégés contre le démantèlement par les croutes ferrugineuses [2]

Références bibliographiques :

[1] BRGM-AQUATER. 1991. exploitation des eaux souterraines en socle cristallin et valorisation agricole : pilote expérimental en milieu rural pour les zones soudano-sahéliennes et sahéliennes. Rapport, Orléans, Volume 4.

[2] Koïta M., Jourde H., Koffi K.J.P., Da Silvera K.S., Biaou A. (2013). Characterization of weathering profile in granites and volcanosedimentary rocks in West Africa under humid tropical climate conditions. Case of the Dimbokro Catchment (Ivory Coast). *Journal of Earth System Sciences*, Volume 122 (3), pp. 841-854.

Multi-scale approach in hydraulic characterization of hard-rock aquifer: a case of study from Paleozoic metarenites of Sardinia (Italy)

Antonella Baiocchi ⁽¹⁾, Walter Dragoni ⁽²⁾, Francesca Lotti ⁽¹⁾, Simone M. Piacentini ⁽²⁾, Vincenzo Piscopo ⁽¹⁾

(1) Department of Ecological and Biological Sciences, University of Tuscia, Viterbo, Italy
piscopo@unitus.it

(2) Department of Physics and Geology, University of Perugia, Perugia, Italy

Hard-rock aquifers, which constitute a water supply source in many countries, are highly heterogeneous. Therefore, defining a realistic model of an aquifer can be extremely complex. The objective of this study was to characterize the hydraulic properties of a fractured, metamorphic aquifer in a representative area of southern Sardinia, Italy. The results of surface fracture surveys, injection tests, pumping tests and simplified numerical model were compared.

From the surface fracture survey, a model of the rock mass characterized by a well-developed discontinuity network and by a high frequency of discontinuities resulted; this implies the possibility of considering the fractured medium as an equivalent porous medium at the outcrop scale. The injection tests showed the extreme heterogeneity and the lower hydraulic conductivity of the rock mass in comparison with the results of the pumping tests. The independent estimate of the hydraulic parameter resulting from numerical model highlighted a range of values higher than those resulting from the pumping tests. However, the mean transmissivity value of the model fell in the range determined in the pumping tests.

The multi-scale characterization of the metamorphic rocks demonstrated that many factors constrained the continuum medium approach, even in the case of a fractured aquifer with a dense network of discontinuities. The multi-scale approach is recommended for investigating hydraulic heterogeneity and can help manage uncertainty by ensuring the accuracy of the obtained results. Nevertheless, hydraulic heterogeneity remains the main problem in the characterization of hard rocks.

An overview of the hydrogeology of the Canadian Shield with emphasis on the Saguenay-Lac-Saint-Jean area

**Alain Rouleau⁽¹⁾, Julien Walter⁽¹⁾, Romain Chesnaux⁽¹⁾,
Vincent Cloutier⁽²⁾, Ian D. Clark⁽³⁾**

⁽¹⁾ Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay (Qué), Canada

⁽²⁾ Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Amos (Qué), Canada

⁽³⁾ University of Ottawa, Ottawa (Ont), Canada

arouleau@uqac.ca; Julien_Walter@uqac.ca; Romain_Chesnaux@uqac.ca;
Vincent.Cloutier@uqat.ca; idclark@uottawa.ca

The Canadian Shield covers roughly half of Canada's surface area and is composed of Precambrian igneous and metamorphic crystalline rocks. The lithologies comprise belts of stratified or banded volcano-sedimentary rocks, as well as bodies of diverse intrusive plutonic rocks, which have been metamorphosed and deformed to various degrees. These rock types are typically of low porosity, but the presence of discontinuities, such as joints, dykes, faults, and fracture zones allows for groundwater flow to take place locally, at different scales and down to a depth of several kilometres. Groundwater is also present in granular aquifers, Quaternary in age, constituted of late glacial fluvial deposits, and of post-glacial deposits such as plains of deltaic systems, particularly along Shield margins. Hydrogeological data are available at very sparsely located sites over the Shield region. These mainly include a number of mine sites, as well as research areas related to nuclear waste disposal. A general decrease in rock mass permeability with depth has been observed at many sites.

In recharge areas, groundwater in the upper hundreds of meters in the bedrock is typically fresh with TDS values of up to about 500 mg/L, and stable isotopes show that groundwater originates from recent meteoric recharge. A gradual downward geochemical evolution is observed from near-surface Ca-HCO₃ type groundwaters to deeper Na-HCO₃ waters. Hypersaline brines of the (Na-Ca)-Cl type are ubiquitous at depths greater than about 1000 m, with TDS values up to 300 g/L.

Recent studies in the Saguenay-Lac-Saint-Jean area have allowed a number of specific observations including : 1) numerous occurrences of groundwaters exceeding the drinking water standards for fluorides and manganese; 2) cases of interconnection, either natural or man-made, between bedrock aquifers and overlying granular aquifers; 3) large fault systems associated with dense fracture networks; and 4) limited recharge in the crystalline bedrock although higher values of recharge may be localized around fault systems.

Interactions entre altération météorique et discontinuités (filons, failles, contacts lithologiques...). **Quelles propriétés hydrogéologiques?**

Dewandel Benoît⁽¹⁾, Lachassagne Patrick⁽²⁾, Zaidi Faisal Kamal⁽³⁾

(1) BRGM, D3E/NRE, Montpellier, France

(2) Danone Waters, Evian-Volvic-World, BP 87, 74500 Evian-les-Bains Cedex

(3) Department of Geology, College of Science, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia

b.dewandel@brgm.fr

Depuis la dernière décennie, des avancées significatives ont été réalisées sur la connaissance hydrogéologique des aquifères de socle ayant subi l'altération supergène. Il en résulte des horizons altérés d'épaisseur pluridécamétrique, stratiformes et parallèle à la paléo-surface contemporaine de l'altération (subhorizontaux), formant ainsi un aquifère stratiforme composé de deux niveaux principaux : saprolite (altérites meubles) et zone fissurée. Les propriétés des aquifères dépendent du degré d'altération. Si, aujourd'hui, la géométrie et les propriétés de ces horizons commencent à être bien décrites, peu d'information existe sur ces propriétés au niveau des discontinuités géologiques (filons, joints, failles, contacts entre lithologies différentes...).

La structure géométrique et les propriétés de l'aquifère dans un tel contexte sont examinées dans le cadre de deux sites expérimentaux situés sur un filon de quartz de 20 à 40 m de largeur (région d'Hyderabad, Inde). La vingtaine de forages réalisée et les profils de tomographie électrique mettent clairement en évidence un très fort approfondissement du profil d'altération (saprolite et zone fissurée) à proximité du filon, donnant ainsi une forme en « U » à la géométrie du profil. Il apparaît aussi que les processus d'altération sont à l'origine de fissures (i) dans le granite, donnant naissance à un horizon fissuré verticalisé, parallèle au filon, mais aussi (ii) au sein du filon de quartz. Les tests hydrauliques ont montré la très bonne connexion hydraulique au sein de la structure en « U » et la forte perméabilité de l'horizon fissuré verticalisé et du quartz fracturé (5×10^{-6} m/s en moyenne). Sur la base des informations recueillies un schéma hydrogéologique conceptuel est proposé.

Par contre, des expérimentations conduites à proximité de filons de dolérite, montrent que l'altération conduit à la formation de matériaux très peu perméables et qu'il n'y a pas d'approfondissement du profil. Contrairement aux filons de quartz, que l'altération transforme en drain hydrogéologique, les filons de dolérite sont apparus comme des limites étanches. La présentation sera élargie aux propriétés d'autres types de discontinuités et permettra la généralisation du modèle stratiforme en y intégrant les discontinuités géologiques.

The role of fault-zones on groundwater flow in crystalline basement

**Roques C.^(1,*), Bour O.⁽¹⁾, Aquilina L.⁽¹⁾, Dewandel B.⁽²⁾, Schroetter JM.⁽³⁾,
Pauwels H.⁽⁴⁾, Marechal J-C.⁽²⁾, Longuevergne L.⁽¹⁾, Le Borgne T.⁽¹⁾, Labasque T.⁽¹⁾,
Vergnaud-Ayraud V.⁽¹⁾, Leray S.⁽¹⁾, Houchreutener R.⁽¹⁾, Lavenant N.⁽¹⁾, Mouglin B.⁽³⁾,
Camerlynck, C.⁽⁵⁾ and Durand, S.⁽⁶⁾**

(1) University of Rennes 1, Rennes, France; (2) BRGM, Water Dept., New Water Resource & Economy Unit, Montpellier, France; (3) BRGM, Regional Geological survey of French Brittany, Rennes, France; (4) BRGM, Water Dept., Orléans, France; (5) UPMC-University of Paris 6, Paris, France; (6) CNAM – ESGT;

(*) Present address: BEE Dept., Oregon State University, Corvallis, USA. Email: roquescllem@gmail.com

Aquifers in crystalline shields are often described as restricted to the sub-surface part of the basement, where jointing and weathering processes occurred. Hydrodynamic properties are generally low and the groundwater resource relatively limited. Fault-zones are heterogeneities that may greatly influence groundwater flow at large scale. It is of crucial interest to characterize the hydrogeological structure and properties of fault-zones in order to achieve their aptitude to constitute a sustainable resource. Here we present the recent improvements on the hydrological conceptualization of fault zones in crystalline rocks from the deep aquifer project CASPAR (OSUR–BRGM). A specific field site, where a significant permeable fault-zone was identified, was developed and monitored for 3 years. A transdisciplinary approach including geological description, sub-surface geophysics, hydrological and bio-geochemical investigations allowed a complete description of the hydrologic behavior of this complex aquifer structure.

We demonstrate how the fault-zone impacts regional groundwater discharge in natural conditions. A transient behavior of discharge flow rate and chemical composition of the water flowing along the fault-zone is related to changes in hydraulic regimes. Transitory recharge processes from different reservoir structures and circulation loops have been quantified. A large scale pumping test was conducted during 2 months. Investigations allowed a complete description of the hydrodynamic properties and partitioning of fluxes induced by pumping. Partitioning induces mixing of waters with different chemical compositions. The contribution of surrounded reservoirs to the flow was quantified through an End-Member Mixing Analysis and the main reactive processes enhanced by pumping were identified. These results are compared to other productive sites and integrated in a regional-scale study (Brittany basement).

The importance of the presence of fractured quartz dykes and veins in groundwater prospecting in metamorphic clayish rocks

Antonio Chambel⁽¹⁾ & Jorge Duque⁽²⁾

¹Instituto Ciências da Terra, Departamento de Geociências, Universidade de Évora, Portugal

²GGT – Gabinete de Planeamento e Gestão do Território, Lda, Évora, Portugal

achambel@uevora.pt; jduque03@gmail.com

In Portugal, hundreds of wells are constructed every year for private purposes by a few hundreds of private companies. With 2/3 of the country based on hard rocks, the hydrogeological knowledge of these aquifers depends, in great part, on the information gathered from these private drillings. An example near the city of Estremoz and others from other areas will be presented. Estremoz is located on the top of a NE-SW metamorphic dolomitic and limestone aquifer with high groundwater productivity (Estremoz Carbonate Aquifer – ECA), with wells producing more than 15 L/s. This aquifer is located in the middle of Paleozoic greywackes, shales, schists, psamites, etc., considered with very low permeability (average productivity of around 1 L/s). Recently, some boreholes for private irrigation of vineyards were drilled on the greywacke and schist environment in the NE face of ECA, around the Orada village, in Borba municipality, on a place with big fractured quartz dike structures associated to the greywackes and schists, seeming associated to NW-SE fractures and to his conjugated NE-SW ones. The most important dikes run parallel to the ECA, creating aligned hills and it was not yet proved that recharge come from ECA.

The reality shows that boreholes on quartz dikes of the greywacke and schist complex have productivities around 12 L/s. The distance of ECA to quartz dike and greywacke and schist complex is about 1 km. Based on one 24 h aquifer test performed in the Orada Vineyard, a specific capacity of 680 m²/day was achieved. Considering field information, the highly productive wells are located along this dyke. Assuming that recharge is higher along this structure, due to high permeability fracturing, and it is very low in the surrounding greywacke and schist areas, it seems that this linear structure has a limited recharge area and, in spite of working also as a collector for the water in the greywackes and schists, this can limit the abstraction volumes along time. Anyway, these kind of structures can be very important for the groundwater supply to local agriculture and human consumption in many rural areas.

Refinement of conceptual groundwater model for fractured aquifer system, Kempfield, SA Australia

Katarina David (1), Wendy Timms(1), Vladimir David(2)

(1)UNSW Australia, (2)Argent Minerals,

k.david@student.unsw.edu.au

A complex metamorphic-sedimentary fractured rock aquifer system at Kempfield, SE Australia has been previously described following the investigation related to potential dewatering and water supply requirements. Additional core drilling and geophysical survey data have confirmed and refined the existence of two major lineament structures steeply dipping and extending N-NE (80 degree dip to the west) and W-NW with subvertical dip. Continued water quality and stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) analysis have allowed further delineation of previously defined fracture zones which were crosscutting and longitudinal to mineralisation. Pore pressure measurements of deep fractured rock and shallow weathered zones have enabled the establishment of vertical gradients and offered alternative recharge infiltration pattern.

The result of additional investigations have shown that the major W-NW lineament is a superior conduit for groundwater flow based on the presence of broken quartz and clay infill within the stress related joints. This is further confirmed by two distinct water types $\text{Cl}+\text{SO}_4$ – $\text{Ca}+\text{Mg}$ and HCO_3 – $\text{Na}+\text{K}$ and presence of artesian conditions. Stable isotope data plots in two groundwater clusters which correlate well with mineralised (rock-water) and non-mineralised zones. All groundwater data plots along the local meteoric water line confirming meteoric groundwater origin, however the pore pressure data imply that weathered zone is separated from deep fractured aquifer. This paper shows the importance of ongoing data collection and interpretation in re-defining and improving the fractured rock aquifer conceptual model.

Permeability in deep-seated granitic rocks: lessons learnt from deep geothermal boreholes in the Upper Rhine Graben

Genter A.⁽¹⁾, Vidal J.⁽²⁾, Baujard C.⁽¹⁾, Dalmais E.⁽¹⁾, Schmittbuhl J.⁽²⁾

¹ES Géothermie, Haguenau, France

²EOST, Université de Strasbourg, France

albert.genter@es-groupe.fr

The French part of the Upper Rhine Graben (URG) is characterized by a series of geothermal anomalies related to natural hydrothermal convection circulating within the fractured crystalline basement. Based on deep drilling operations ranging between 2.6 and 5 km depth at Rittershoffen and Soultz-sous-Forêts respectively, occurrences of hydrothermal fluid circulations have been evidenced in the granitic basement in framework of industrial and scientific geothermal projects. In those geothermal wells, bottom hole temperature ranges from 170 to 200°C for wells drilled to 2.6 and 5 km depth respectively.

Water bearing fractures characterized by geothermal brines (TDS 100g/L) have been observed in hard-rocks such as Triassic clastic sediments as well as in Paleozoic crystalline basement. Based on geological and structural observations on continuous coring, several thousand of nearly-vertical fractures exhibit systematically hydrothermal secondary deposits such as geodic quartz, clay minerals, carbonates (calcite, dolomite, ankerite), sulfates (anhydrite, barite) or sulphides (galena, pyrite). Based on borehole image logs, temperature profiles and spinner logs collected in the wells, a rather limited number of fractures or hydrothermally altered and fractured zones match spatially with discrete outflow anomalies.

Due to low initial fracture permeability, open-hole sections underwent hydraulic and chemical stimulations in order to increase the hydraulic performances by hydro-shearing and/or by dissolving sealed fractures in the granite. Various results were achieved in terms of enhanced post-stimulation permeability. In some cases, artesian wells exhibit sufficient initial fracture permeability, compatible with industrial flow rate, avoiding costly stimulation operations. Thus, the deep-seated fractured sediment-basement interface of the URG is the main geological hard rock target for new geothermal projects planned in Northern Alsace as well as in Strasbourg area.

Les calcaires paléozoïques Mayennais

Alexis Robert

Conseil général de la Mayenne

alexis.robert@cg53.fr

Le département de la Mayenne appartient presque exclusivement au socle armoricain. Les formations rencontrées sont majoritairement des schistes, des grès, des granites et leur auréole de métamorphisme mais aussi des calcaires paléozoïques (Cambrien et Carbonifère principalement).

Le développement d'un karst dans les calcaires paléozoïques

Parler de karst dans les calcaires du massif armoricain est loin d'être un abus de langage. Un important travail réalisé dans le département de la Mayenne par des spéléologues a permis de décrire plus de 150 cavités. La cavité la plus développée est située dans les calcaires cambriens du synclinal des Coëvrons. Les cavités les plus connues sont les grottes du secteur de SAULGES, dans les calcaires carbonifères. L'homme préhistorique y a laissé des traces (dessins, gravures, outils, ...). Ces karsts sont également observables dans des carrières dans lesquelles des conduits karstiques sont recoupés par les fronts de taille et où les arrivées d'eau peuvent être très conséquentes. La compréhension de l'alimentation en eau de ces carrières est difficile à appréhender sans des études approfondies. D'autre part, la formation et le fonctionnement passé de certaines manifestations karstiques observées en profondeur dans les carrières mériteraient d'être étudiés.

L'importance des calcaires pour l'alimentation en eau potable

Si les formations calcaires ne représentent qu'environ 10 % de la surface du département, elles assurent plus de 50 % des volumes d'eau souterraine destinée à l'eau potable et 20 % de la production totale. Les plus importantes ressources sont situées dans le Cambrien libre du synclinal des Coëvrons qui a fait l'objet d'une étude hydrogéologique mettant en évidence l'importance des volumes mobilisables. Les calcaires carbonifères du synclinorium de LAVAL présentent également des potentialités très intéressantes pour le département, soit dans des aquifères libres soit dans des aquifères semi-captifs. Huit captages dans le Cambrien et le Carbonifère libres, tous soumis à des pollutions azotées diffuses, sont inscrits à la liste des captages prioritaires. C'est ainsi que près de 60 km² de bassins d'alimentation font l'objet d'opérations de reconquête de la qualité de l'eau et d'études hydrogéologiques, en particulier des traçages présentant des vitesses de restitutions étonnamment faibles.

Références bibliographiques :

BIGOT, J.Y., 2001 - Les cavernes de la Mayenne - Etude et inventaire - *Spéléo-Club de Paris, Club alpin français*

CALLIGEE, février 2013 – Traçage de pertes sur les bassins d'alimentation des captages de l'Écrille et de la Fortinière

EDREE, juillet 2014 - Traçage sur le bassin d'alimentation du captage de Vaubourgueil

PIVETTE Consultant, avril 2010 – Étude hydrogéologique du synclinal des Coëvrons

Bilan de 25 années de prospection des aquifères de socle en Nouvelle-Calédonie

Lebon David¹; Caze Nicolas¹; Peltier Jean¹; Yves Hmae¹; avec la collaboration de
Jean-Jacques Espirat², Michel Vandenbeusch³ et Jacques Leguéré²

(1) A2EP ; (2) Expert géologue ; (3) Expert hydrogéologue
a2ep@a2ep.nc; david.lebon@a2ep.nc

La prospection hydrogéologique des aquifères de socle en Nouvelle-Calédonie fait partie des activités historiques d'A2EP. Ce type de prospection a été initié par le BRGM dans les années 60 à 80, pour des travaux de reconnaissance des aquifères. Les prospections se sont ensuite largement généralisées à partir de 1991, sous l'impulsion d'A2EP, pour la recherche d'eau pour les particuliers, les communes et les provinces.

La méthode mise en œuvre est une méthode de prospection « légère », facile à déployer et adaptée pour la recherche d'eau à l'échelle d'une parcelle de quelques hectares à quelques centaines d'hectares. Elle est basée sur trois étapes : (i) une première étape de synthèse des données bibliographiques et de recherche de linéaments par photo-interprétation ; (ii) la mise en œuvre d'une prospection géophysique, par trainés et/ou sondages électriques et (iii) l'implantation de la cible de forage.

Un bilan de 25 années de prospection, obtenu à partir des résultats des forages réalisés (échantillon non exhaustif de 349 ouvrages), permet de confirmer la fiabilité de la méthode, avec un retour positif pour 70% des ouvrages réalisés, qui sont caractérisés par un débit moyen situé autour de 5 m³/h. Les résultats de l'analyse statistique des données montrent que la distribution **azimutale des linéaments** est prépondérante dans le succès de la prospection : les forages les plus productifs sont implantés sur des linéaments dont les directions s'inscrivent dans la plage N20-N70. L'établissement de la relation entre la distribution azimutale des linéaments et l'indice de productivité des ouvrages (en m³/h / m foré) constitue un premier guide pour la prospection des aquifères de socle calédonien. La **nature géologique des aquifères** joue également un rôle dans les résultats obtenus. On peut ainsi distinguer et hiérarchiser trois grands types d'aquifère qui associés aux grandes unités lithostratigraphiques de Nouvelle-Calédonie :

- 1- **Les formations ophiolitiques**, avec : (a) l'unité basaltique de Poya, qui se détache nettement des autres aquifères, avec les débits et les transmissivités moyennes les plus élevés (6.8 m³/h ; 8.6.10⁻³ m²/s) (b) la nappe des péridotites, caractérisée par des débits élevés et des transmissivités moyennes (6.3 m³/h ; 7.3.10⁻⁴ m²/s) ;
- 2- **Les formations de la couverture sédimentaire** : unités du Crétacé supérieur, du Crétacé-Paléocène et du Paléogène, qui sont caractérisées par des débits situés autour de la moyenne calédonienne (4-6 m³/h) et des transmissivités moyennes (de 7.10⁻⁴ à 2.9.10⁻³ m²/s) ;
- 3- Les unités **métamorphiques Haute Pression-Basse Température** et celles du **socle ancien Mésozoïque**, qui sont caractérisées par les transmissivités les plus médiocres (<5.10⁻⁴ m²/s) et les débits les plus faibles (<5 m³/h, à l'exception des ouvrages de l'unité Mésozoïque de la chaîne centrale, dont les débits moyens sont proches de ceux de la couverture sédimentaire).

Hydrogéo-psychologie : la dépense gâchée des forages profonds en roche de socle

Jean-Christophe Marechal ⁽¹⁾

(1) BRGM, Water Environment & Ecotechnologies Division; jc.marechal@brgm.fr

Dans les zones de socle, les données diverses obtenues à partir de tests hydrauliques suggèrent l'existence d'une décroissance de la perméabilité avec la profondeur. La présence d'une zone superficielle à perméabilité plus élevée (zone « active ») qui recouvre une zone plus profonde et moins perméable (zone « inactive ») a été décrite par de nombreux auteurs [1]. Généralement, les fractures peu profondes sont les plus nombreuses avec les ouvertures les plus grandes, de telle façon que le rendement de la plupart des forages n'augmente plus au-delà de la base de cette zone active. Des exceptions peuvent se produire lorsque des failles ou fractures hydrauliquement actives sont présentes en profondeur (200-300 m) suite à l'activité tectonique. Néanmoins, statistiquement, il est évident qu'au-delà de la base de la zone active, la probabilité d'augmenter le rendement d'un forage donné est très faible. Ces résultats questionnent la tendance actuelle en Inde et dans d'autres régions du monde à forer toujours plus profondément dans les aquifères de socle. On observe en effet actuellement des ouvrages d'exploration forés jusqu'à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres, bien au-delà de la « zone active ». Quelle est l'origine de ce grand écart entre la connaissance scientifique et la pratique hydrogéologique ? Un élément d'explication peut être trouvé du côté des sciences psychologiques et comportementales. L'escalade d'engagement consiste à s'engager plus avant dans un cours d'action qui s'est révélé jusqu'alors infructueux. Depuis Staw [2], on appelle *escalade d'engagement* cette tendance que les gens manifestent à s'accrocher à une décision initiale même lorsqu'elle est clairement remise en question par les faits. Dans les affaires et l'économie, elle prend la forme de la *dépense gâchée* : accroître les subsides à une filiale qui perd de l'argent dans l'espoir de récupérer les pertes passées. Plus généralement, la dépense gâchée consiste en une tendance à persévérer dans un comportement une fois qu'un investissement en argent, effort ou temps a été consenti [3].

Dans le domaine de l'exploration des eaux souterraines, la dépense gâchée se manifeste en forant des ouvrages de plus en plus profonds dans l'espoir de récupérer l'argent engagé pour forer les premiers mètres secs. Le *piège abscons* est le suivant : une fois un forage entamé, il est difficile pour le maître d'ouvrage de l'arrêter alors que celui-ci est sec car il espère que la fracture productive est peut-être située seulement quelques mètres plus profondément. Les études de psychologie montrent que le moyen le plus efficace de lutter contre ce type de piège abscons est d'agir sur la détermination, a priori, d'une limite à ses investissements ; dans le cas qui nous occupe, il s'agit de la profondeur maximale au-delà de laquelle on décide d'arrêter le forage. La question à laquelle les scientifiques doivent répondre est quelle est cette profondeur ? Cette profondeur, qui correspond à la zone « active » du socle, varie d'un endroit à l'autre selon son histoire géologique : tectonique, érosion, altération. La succession de ces différentes phases géologiques ainsi que les vitesses relatives d'érosion versus altération/fracturation déterminent l'épaisseur de la zone active. Dans un secteur d'exploration, des études statistiques régionales des rendements des forages en fonction de leur profondeur doivent être couplées à des études géologiques de façon à estimer l'épaisseur de la zone active et ainsi définir a priori une limite de profondeur au-delà de laquelle un forage d'exploration doit être arrêté [1].

Références bibliographiques :

[1] Maréchal, J.C. (2010) – Editor's message: the sunk cost fallacy of deep drilling, *Hydrogeology Journal*, 18: 287-289, doi: 10.1007/s10040-009-0515-2

[2] Staw, B.M. (1976) - Knee-deep in the big muddy: a study of escalating commitment to a chosen course of action. *Organizational Behavior and Human Performance*, 16(1): 27-44.

[3] Arkes, H.R. and Blumer, C. (1985) - The psychology of sunk cost. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 35(1): 124-140.

SESSION 1

**MODELES CONCEPTUELS D'AQUIFERES DE SOCLE :
PROCESSUS A L'ORIGINE DE LEUR PERMEABILITE**

**HARD ROCK AQUIFERS (HRA) CONCEPTUAL MODELS:
PROCESSES AT THEIR ORIGIN**

POSTERS

P1-1

Les surfaces d'aplanissement du Massif armoricain : relations avec les profils d'altérations, potentiels aquifères de socle

Paul Bessin ⁽¹⁾⁽⁴⁾, François Guillocheau ⁽¹⁾, Cécile Robin ⁽¹⁾,
Hugues Bauer ⁽²⁾, Jean-Michel, Schroëtter ⁽³⁾

⁽¹⁾ Géosciences Rennes, UMR 6118, OSUR, Université Rennes 1-CNRS, 35042 Rennes cedex

⁽²⁾ BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060, Orléans cedex

⁽³⁾ BRGM, DR Bretagne, 2 rue de Jouanet, 35700, Rennes

⁽⁴⁾ actuellement : Université du Maine, UFR Sciences et Techniques, 72085 Le Mans cedex 09
paul.bessin@gmail.com ; paul.bessin@univ-lemans.fr

Le Massif armoricain est un domaine de socle, principalement varisque, dont l'évolution géologique depuis 200 Ma est controversée. Comme pour de nombreux domaines de socle européens, des profils d'altération, parfois très fortement développés et étroitement associés à des surfaces d'aplanissement – surfaces topographiques quasi-planes tronquant les structures du socle sous-jacent – sont reconnus sur ce massif. L'analyse de ces surfaces d'aplanissement, de leur organisation et de leur genèse peut donc constituer un élément intéressant dans la compréhension de l'agencement et de la formation des profils d'altération et des aquifères de socle pouvant y être associés (e.g. aquifères des horizons fissurés).

Nous avons réalisé une étude géomorphologique terre-mer (analyse de MNT et contrôles terrain) de ces surfaces d'aplanissement. Celle-ci est basée sur leur (i) cartographie au 1/80000^{ème}, (ii) chronologie relative, (iii) datation au moyen des dépôts sédimentaires datés les fossilisant et (iv) relation avec les profils d'altération datés.

Les résultats obtenus mettent en évidence neuf surfaces d'aplanissement étagées et permettent de proposer un modèle de croissance du relief armoricain depuis 200 Ma. L'analyse de leurs relations avec les profils d'altération soulignent les points suivants :

- (1) La surface d'aplanissement majeure du massif (Surface armoricaine; altitude 50-110 m), polygénique (âge d'initiation: ante-100 Ma), résulte d'une phase d'altération intense (latérites) et d'érosion physique contemporaine de l'ouverture du Golfe de Gascogne (Crétacé inférieur).
- (2) Une génération de surfaces d'aplanissement (pédiments), de plus bas niveau topographique (altitude : 20-50 m), résulte d'une seconde phase d'altération intense au Paléocène-Éocène inférieur (65-41 Ma) en lien avec la convergence des plaques Ibérie-Eurasie. La Surface armoricaine est simultanément retouchée et de nouveau altérée.

La cartographie de ces surfaces d'aplanissement et les données disponibles sur la répartition et l'épaisseur des profils d'altération permet une discussion, à l'échelle régionale, de l'intérêt des surfaces d'aplanissement dans la reconnaissance des potentiels aquifères de socle en lien avec des profils altérations (horizon fissuré).

P1-2

Aquifère de socle sous couverture sédimentaire : quelles sont les propriétés hydrodynamiques du profil d'altération ? Exemple du granite de Saint Galmier (France)

Benoît Dewandel⁽¹⁾, Patrick Lachassagne⁽²⁾, Vincent Bailly-Comte⁽¹⁾, Sandra Lanini⁽¹⁾, Bernard Ladouche⁽¹⁾, Jean-Christophe Marechal⁽¹⁾, Renaud Couëffe⁽³⁾, Christine Barbet⁽²⁾, Sandrine Grataloup⁽³⁾ & Robert Wyns⁽⁴⁾

(1) BRGM, D3E/NRE, Montpellier, France; b.dewandel@brgm.fr

(2) Danone Waters, Evian Volvic World, Evian, France

(3) BRGM, DGR/GBS, Orléans, France, (4) BRGM, DGR/GAT, Orléans, France

Depuis la dernière décennie, des avancées significatives ont été réalisées sur le fonctionnement hydrogéologique et les propriétés des aquifères de socle en surface lorsque ceux-ci ont été exposés à l'altération supergène [1, 2, 3]. La présente étude s'attache à décrire les propriétés hydrodynamiques de tels aquifères mais lorsque ceux-ci ont été enfouis ultérieurement sont une épaisse couche de sédiments. Le granite de Saint de Galmier (Loire, France) est localisé au sein d'une région à la géologie complexe, formée d'un graben de socle (granite) rempli de sédiments tertiaires argileux et sableux. Les failles bordières du graben, du moins pour sa partie Est, constituent le point d'émergence du système minéral profond ayant donné naissance au gisement de l'eau minérale naturelle carbonatée de Badoit. Les nombreuses études menées sur ce site - géophysiques (sismique), géologiques avec les données d'une trentaine de forages atteignant le socle parfois sous plus de 200 m de couverture sédimentaire - ont clairement mis en évidence l'existence d'un profil d'altération épais de plus d'une centaine de mètres (saprolite : 5 à 20 m, zone fissurée perméable : 100-125 m). Les analyses statistiques menées sur les données des forages (débit à l'air-lift) confirment l'existence d'un tel profil. La structure du profil est décalée par des failles nord-sud résultant de la mise en place du graben, donnant ainsi une structure géométrique en « touches de piano » au profil d'altération. Les essais hydrauliques réalisés sur ces forages montrent que ce profil est anormalement transmissif, aux environs de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, comparé à ce qui est connu pour de tels aquifères (en général $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$). Le profil devient néanmoins beaucoup moins transmissif ($10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) lorsque la couverture sédimentaire devient épaisse. Les essais montrent aussi une structure très compartimentée de l'aquifère, constituée de zones perméables n'excédant pas quelques km^2 de superficie, limitées par les failles structurant le graben (limites étanches en général).

L'ensemble des données spatiales, géologiques (toit du granite et préservation ou non du profil d'altération), hydrodynamiques (transmissivité totale, transmissivité des fractures), géochimiques (minéralisation des eaux, ratio Ca/Na, contribution des pôles calcique et sodique profonds), a permis non seulement de confirmer la géométrie des aquifères, mais aussi de révéler d'autres structures (failles N130 obliques aux failles bordières du graben N-S), alimentant en fluides profonds minéralisés les aquifères du granite. Ainsi, les ouvrages exploités du gisement de Badoit sont principalement implantés dans l'horizon fissuré d'un ancien profil d'altération envahi par des fluides profonds minéralisés principalement issus de ces structures obliques aux failles bordières du graben.

Références bibliographiques :

[1] 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). Bull. Soc. Géol. France 175 (1), 21–34.

[2] Dewandel B., Lachassagne P., R.Wyns, Maréchal J.C. and N.S. Krishnamurthy, 2006. A generalized hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. J. of Hydrology, 330, 260-284.

[3] 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

P1-3

Hydrogeologic and hydrochemical framework of a weathered basement fractured aquifer, southern Oban massif (Nigeria)

Aniekan Edet⁽¹⁾ Chiedu S. Okereke

*Department of Geology, University of Calabar,
POB 3609, Calabar, Nigeria.

aniekanedet@yahoo.com; aniekanedet25@gmail.com

Detailed local geological, geoelectrical and hydrogeological investigations were carried out in Oban massif basement complex (southeastern Nigeria) to delineate and characterize the architecture of the shallow regolith aquifer. Surface resistivity data shows that the area is characterized variously by distinctive 2, 3 and 4 geoelectric layers.

These geoelectrical layers are combined to give a generalized hydrogeological model namely: upper, middle, and lower regolith aquifers. The upper aquifer is characterized by average resistivity values of 300 Ω m, while that of the middle regolith aquifer is 600 Ω m. The mean resistivity for the lower regolith aquifer is 350 Ω m. The mean values for saturated thickness of aquifer/depth to water levels are 1.05 m/ < 1.0 m; 20.4 m/ < 5.0 m and 77.13 m/ > 5.0 m respectively for the upper, middle, and lower aquifers respectively.

These values indicate that the upper aquifer has less water and is more vulnerable to contamination in comparison to the middle and lower aquifers. Aquifer parameters (porosity, yield, hydraulic conductivity and transmissivity) were estimated from empirical relations. The computed groundwater reserve computed from Darcy' Law for the regolith aquifer is about $96,834 \times 10^6 \text{ m}^3$. Groundwater chemistry in the massif is controlled by water-rock interactions mainly weathering of silicate minerals and ion exchange.

Management problems include lack of pre-drilling investigations and poor well construction. Study concludes that for proper harnessing of the groundwater resource, identification and evaluation of the water bearing unit on a site-to-site basis will guide the proper development of groundwater resource in fractured aquifer media.

P1-4

Implications de l'organisation et du fonctionnement des aquifères de socle sur leur exploitation

Jean-Pierre Faillat

Université de Bretagne Occidentale, UFR des Sciences et Techniques

faillat@univ-brest.fr; yjpf@free.fr

La gestion rationnelle des ressources en eau que contiennent les roches fissurées, du fait de leur forte hétérogénéité et de difficultés d'étude favorisant les biais d'interprétation [1], en suppose une connaissance et une conception aussi réaliste et équilibrée que possible. La complexité de ces hydrogéosystèmes implique donc une approche pluriméthodologique à diverses échelles d'observations et de mesures, sur divers ouvrages, dans des environnements géologiques, morphologiques et climatiques différents.

Les informations obtenues ainsi après des travaux effectués à des échelles métriques à kilométriques, souvent à l'aide de sites expérimentaux [2, 3], conduisent à proposer un schéma d'organisation et de fonctionnement des hydrogéosystèmes de socle. Dans ce schéma, des formations superficielles diverses, principalement des altérites, de nature, de mise en place et de caractéristiques particulièrement variées, reposent sur un soubassement de roches dures comportant des réseaux de fissures hydrauliquement actives, plus ou moins régulièrement distribuées, résultat de la superposition des effets de phénomènes générateurs de discontinuités, principalement d'origine tectonique (fractures). Altérites et roches dures constituent un ensemble assimilable à un aquifère bicouche du type drain (la roche dure fissurée) - capacité (les formations meubles superficielles). Le drain, fortement diffusif, permet des écoulements relativement importants et transmet rapidement et loin l'influence des pompages, suivant certaines directions préférentielles dans le cas d'une anisotropie avérée. La capacité, faiblement diffusive, fournit l'essentiel des volumes d'eau exploitables, provenant des pores d'interstices, mais à un rythme lent. La disponibilité du matériel de forage approprié a logiquement orienté, depuis le milieu des années soixante-dix dans les pays francophones, l'exploitation des ressources en eau du socle par l'intermédiaire des réseaux de fissures hydrauliquement actives.

Les caractéristiques hydrauliques des aquifères de socle conditionnant les possibilités d'exploitation et de gestion sont fortement contraintes par les interactions hydraulique entre les altérites et la roche dure fissurée, la distribution spatiale des fissures, notamment en profondeur ou suivant certaines directions privilégiées, celle des poches ou des couloirs d'altération, ainsi que par le compartimentage des aquifères. Si un schéma d'ensemble de l'organisation et du fonctionnement des hydrogéosystèmes de socle est actuellement accessible, les différents points cités dans ce paragraphe restent cependant à préciser pour une meilleure mise en valeur de leurs ressources en eau.

Références bibliographiques succinctes :

[1] Faillat J.P., Dubearnes B., Squarcioni P., 2002 - Représentativité des données obtenues dans les forages en milieu fissuré et erreurs d'interprétation. 1^{er} Colloque sur les Sites et Sols Pollués, bilan et perspectives. ADEME, Paris, 12-13 décembre 2002, communication orale, actes sur disque, 6 p.

[2] Engalenc M., 1978-1979 : Méthode d'étude et de recherches de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. C.I.E.H., Ouagadougou et Géohydraulique, Maisons-Alfort, T. 1, 318 p. et T. 2, 193 p.

[3] Faillat J.P., C. Drogue C., 1987 - Influence de l'effet d'échelle, de l'hétérogénéité et de la connexité des aquifères fissurés sur la réaction des forages en zone de socle (Afrique de l'Ouest). *Journal of Hydrology*, 90, pp. 159-182

Implication de l'organisation et du fonctionnement des hydrogéosystèmes de socle sur leur exploitation

Implication of the organization and functioning of bedrock groundwater on their exploitation

Faillat J.P.

Université de Bretagne Occidentale, UFR des Sciences et Techniques
faillat@univ-brest.fr et yjpf@free.fr

I. INTRODUCTION

La gestion rationnelle des ressources en eau que contiennent les roches fissurées et altérées de socle, du fait de leur forte hétérogénéité et de difficultés d'étude favorisant les biais d'interprétation (Faillat et al, 2002), en suppose une connaissance et une conception aussi réalistes et équilibrées que possible. De nombreux travaux ont été consacrés à ce milieu, depuis que, dans les années 70, la technologie de foration en rotation-percussion à l'air, enfin disponible en zone francophone, a permis de forer efficacement et économiquement les roches dures. Avant cela, la recherche de ressources était forcément limitée aux altérites, avec des résultats généralement insuffisants, surtout en zone tropicale. Pour tenter de parvenir à une vision d'ensemble de ce milieu complexe, il est nécessaire de procéder à des approches pluriphénoménologiques et pluriméthodologiques à diverses échelles d'observations et de mesures, sur des ouvrages nombreux et proches, dans des environnements géologiques, morphologiques et climatiques variés.

A défaut, il est possible d'aborder et d'essayer d'évaluer certains aspects fondamentaux de l'hydrogéologie de socle en ce qui concerne leurs effets sur la productivité des forages d'exploitation. Dans ce texte, le terme de "fissure" est employé pour désigner toute discontinuité apparaissant dans les roches dures quelle qu'en soit l'origine, alors que le terme "fracture" correspond à des discontinuités uniquement d'origine tectonique.

II. EFFET DE L'HETEROGENEITE

C'est, et de loin, le phénomène le plus évoqué, du fait de ses conséquences pratiques : à quelques mètres près dans l'espace, un forage peut aboutir à un succès ou à un échec. L'hétérogénéité fondamentale correspond à l'existence de 2 couches aux propriétés hydrauliques contrastées : d'une part des roches dures à porosité de fissures, peu capacitives mais souvent à fortes diffusivités, surmontées de leurs produits d'altération à porosité d'interstices, souvent fortement capacitifs, mais à relativement faibles diffusivités, que les roches soient schistosées, feuilletées ou massives. Dans chaque couche, la distribution de la porosité et de la conductivité hydraulique est très irrégulière, ce qui crée un autre niveau d'hétérogénéité. Le passage d'une couche à l'autre se fait plus ou moins progressivement et en continuité hydrodynamique.

forages dans les altérites meubles uniquement (S) et des sondages à la tarière à main atteignant la surface de la nappe (T). Le bloc-diagramme de la Figure 2 montre la relation des forages centraux avec la fissure principale, dont la géométrie a été déduite de la réaction des forages en cours de pompage. A un instant donné (Figure 3), le dessin de la piézométrie des 3 types d'ouvrages montre, malgré une répartition de ceux-ci sur une surface trop restreinte, un allongement du cône de rabattement des forages conforme à la direction de l'anomalie conductrice et de la fissure principale. Cet effet est encore discernable pour les forages dans les altérites, mais plus dans les sondages à la tarière, qui réagissent néanmoins au pompage.

III.2 Sur le compartimentage des aquifères fissurés

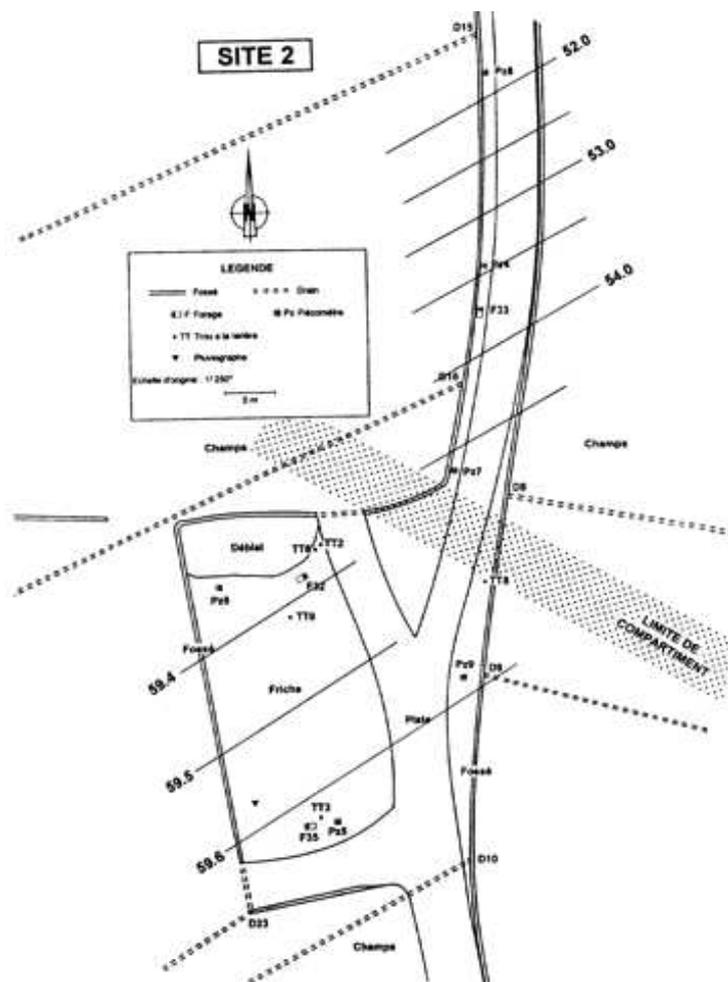


Figure 4 - Site 2 du périmètre expérimental de Kerveldréach (Finistère). Piézométrie au repos montrant environ 5 mètres de décalage entre les 2 compartiments (Somlette, 1998)

faible profondeur). Cette limite correspond à une anomalie de polarisation spontanée (PS). Le compartiment amont (sud) est assez facilement artésien en hautes eaux (+1 m). Les différents types d'ouvrages artésiens, dont les sondages à la tarière de 2 m de profondeur, délivrent alors de l'eau dénitrifiée.

Dans une région à fort relief, le site expérimental de Campoussy (Faillat et Drogue, 1993) correspondant à un captage en activité, installé sur les granites de Millas-Guérigut, montre un cas de compartimentage

On peut considérer, en quelque sorte, le compartimentage hydraulique des aquifères fissurés comme une conséquence extrême de l'anisotropie. En effet, avec un dispositif d'observation approprié, hélas rarement disponible, il est possible de constater, parfois, que suivant une direction donnée, l'influence d'un pompage n'est pas seulement atténuée, comme c'est le cas habituellement, mais qu'elle est carrément impossible, au moins dans un sens. C'est la conséquence de la présence d'une singularité hydraulique se comportant comme un écran imperméable, qu'il s'agisse d'une limite de compartiment très peu ou pas fissuré ("noyau préservé"), ou d'altération argileuse de brèches de failles, de couches inclinées à dominante argileuse en milieu plissé, d'un filon de roche basique fortement altéré et argileux, etc...

Dans le périmètre expérimental de Kerveldréach (PEK), sur schistes briovériens, la limite de compartiment (Somlette, 1998) se manifeste en

empêchant la propagation de l'effet de celui-ci du nord vers le sud et en l'atténuant très fortement en sens inverse (échange par déversement à

particulièrement favorable, puisqu'il permet la retenue d'une nappe sur un versant à forte pente. Il s'agit en fait de la combinaison de cet écran et de la préservation d'un replat qui correspond à un des reliquats d'une surface d'érosion (500-600 m) que l'on retrouve tout autour du massif. Le site est équipé de 7 forages de 26 à 100 m et de sondages à la tarière à main. La nappe se maintient toute l'année. Le débit instantané du forage d'exploitation est de 30 m³/h. Le volume d'eau prélevé par jour est de 5 à 15 m³/h. Le versant qui surplombe le replat contribue de façon importante à son alimentation souterraine.

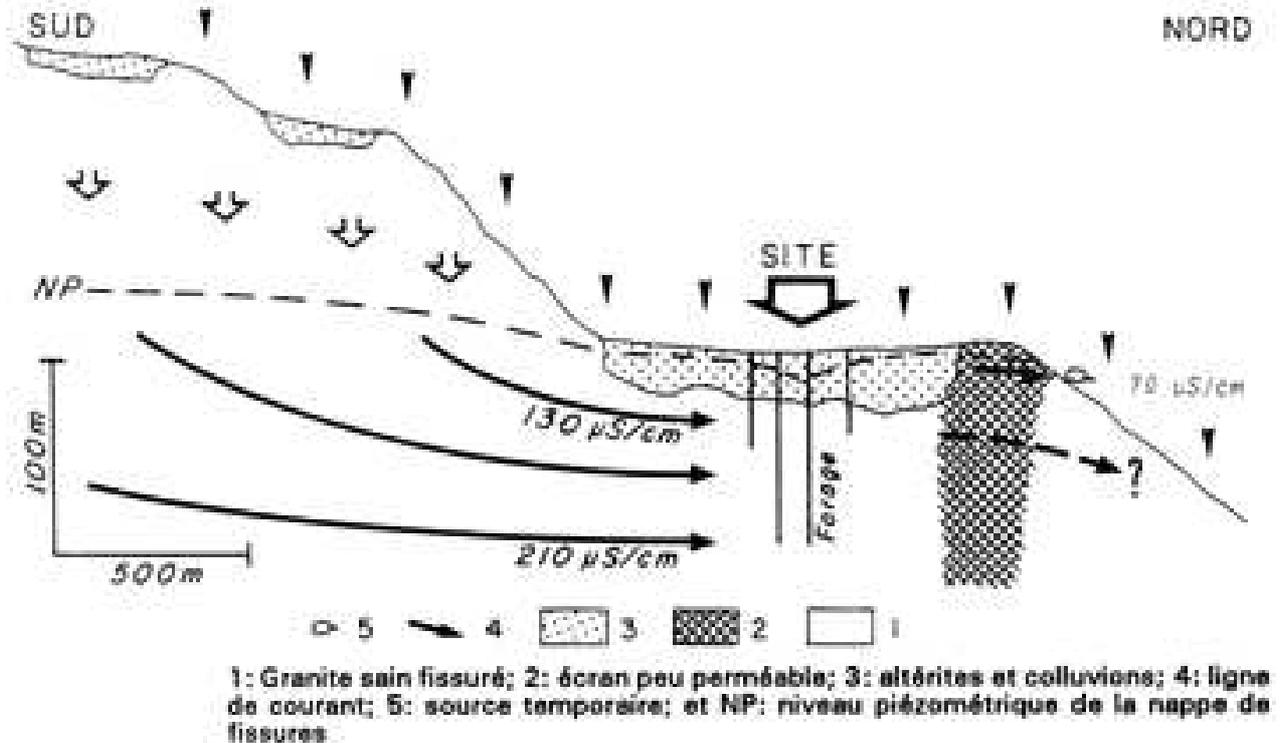


Figure 5 - Site expérimentale du captage de la commune de Campoussy (Pyrénées Orientales). Coupe montrant l'effet d'un écran peu perméable sur la préservation d'une nappe.
Conductivité électrique à 20°C

III.3 Sur la distribution verticale des arrivées d'eau (AE) et de leurs débits

classe des débits les plus fréquents (m ³ /h)	Pénétration moyenne dans la nappe (m)	Profondeur moyenne des ouvrages (m)	Nature des ouvrages et lithologie
0,5	1 à 2	11,5	79 puits. Haute Volta granites.
0,5 à 2	environ 10	15,5	44 forages. granites. Ghana. 41 puits. schistes. Côte d'Ivoire.
2 à 4,5	environ 20	32,5	24 forages. granites. Haute Volta.
4,5 à 9	30 à 35	36 à 42	304 forages. granites et schistes. Ghana.
9	50 à 70	60	259 forages. schistes. Ghana.

Tableau 1 - Relations entre les débits, les hauteurs d'eau et les profondeurs moyennes des premiers programmes d'hydraulique villageoise (Burgeap, 1971)

Les arrivées d'eau sont généralement observées à l'avancement lors de la foration, et beaucoup plus rarement, par des vidéo-carottages, ou par des diagraphies des vitesses à l'aide de courantomètres en pompage, ou encore par des diagraphies des conductivités hydrauliques réalisées avec des trains d'obturateurs et la méthode des chocs hydrauliques ou autre.

L'importance des programmes d'hydraulique a généré des données très nombreuses, mais de qualité

très inégale, étudiées dans une abondante littérature, dans les années 70 à 90.

Une relation entre débits et épaisseur des altérites, même très peu perméables, apparaît souvent (Assouma, 1982; Omorinbola, 1982), ce qui est en accord avec les informations tirées des dispositifs expérimentaux, où il est possible d'observer la relation anomalies électriques conductrices, sur-épaisseur des altérites et à l'aplomb, abondance relative de fissures génératrices d'anisotropie et fortement diffusives.

C'est finalement ce qui pourrait expliquer en partie le Tableau 1 (Burgeap, 1971), qui montre que les débits moyens des programmes d'hydraulique villageoise, quelle que soit l'hétérogénéité des données, de la géologie, des climats, des consignes de foration, en supposant que les implantations des ouvrages sont à peu près identiques, tendent à progresser régulièrement avec la profondeur moyenne des ouvrages et la pénétration moyenne dans la nappe et par conséquent, une utilisation croissante des aquifères fissurés.

Par contre, si l'on considère un programme d'hydraulique déterminé, des graphes mettant en relation débits et profondeur des forages ou des AE (Omorinbola, 1982; Cairon, 1981) montrent un optimum vers 30 à 70 m de profondeur pour les débits, puis une chute de ceux-ci. Ce résultat est apparemment en contradiction avec le Tableau 1, bien qu'il soit probable que le nombre des AE et leur débit diminuent avec la profondeur, mais cette relation peut être faussée par des biais, tels la stratégie de foration, les procédés d'implantation, les facteurs humains, et surtout, le caractère fondamentalement hétérogène des roches dures.

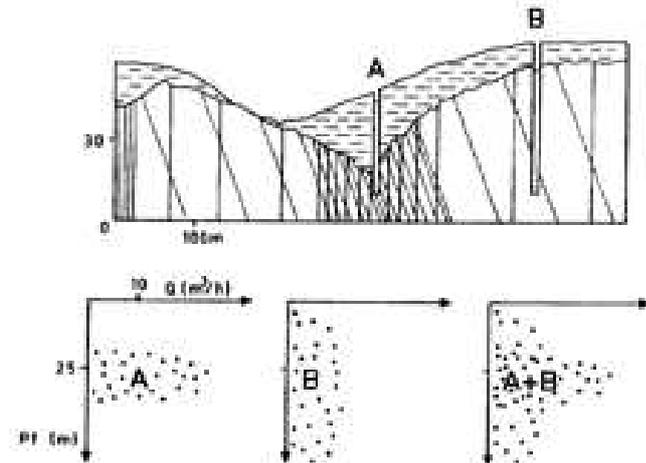


Figure 6 - Schéma explicatif de l'influence de l'hétérogénéité de fissuration sur les débits instantanés et la profondeur des forages

La Figure 6 (Faillat, 1985) propose une explication basée sur le fait que la distribution de la fissuration est inégale, pour des raisons géologiques, ce qui peut déterminer, à des échelles d'ordre local à régional, des zones à fissuration dense, favorables (A) et d'autres à fissuration lâche, peu favorables (B). Des forages faits en A trouveront, à la base des altérites parfois ("arènes grenues"), et dans la roche fissurée, des AE relativement nombreuses et abondantes qui permettront d'atteindre le débit de succès avant d'atteindre la profondeur d'arrêt. Le contraire se produit en B, la profondeur d'arrêt pouvant même être atteinte sans débit exploitable. La superposition des graphes $Q = f(P)$ obtenus en A et B donne un graphe global ayant l'allure de ceux que l'on obtient pour un programme d'hydraulique déterminé.

IV. EFFET DE LA DRAINANCE

Lors de pompages dans des forages cimentés au niveau des altérites mais alimentés par des AE dans la roche fissurée, si l'on dispose de sondages atteignant la zone saturée mais ne traversant que les altérites, il est alors possible, sans difficultés particulières, avec plus ou moins de retard, de constater dans ces sondages une réponse au pompage, par effet de drainance hydraulique. Le cône de rabattement dans les fissures adoptant une forme allongée suivant la direction de la plus forte diffusivité, on constate souvent, bien que de façon plus ou moins atténuée, le développement dans la nappe d'altérites d'un cône de rabattement ayant la même direction d'allongement (cf Figure 3). Les courbes de rabattement d'un pompage (Faillat et Drogue, 1987) fait sur le site expérimental de Yamoussoukro (Figure 8) montrent que

tous les ouvrages, aussi bien ceux qui n'atteignent que la surface de la nappe que ceux qui traversent les altérites et ceux qui pénètrent dans la roche dure, tous réagissent au pompage dans P2 au débit de 3,4 m³/h pendant 43 h. Les rabattements maxima sont compris entre 1,1 (T16) et 25,5 m (P2). Ce phénomène

de drainage est régulièrement observé dans les piézomètres réalisés uniquement dans les altérites, lors de pompages en milieu fissuré, sur tout type de roches.

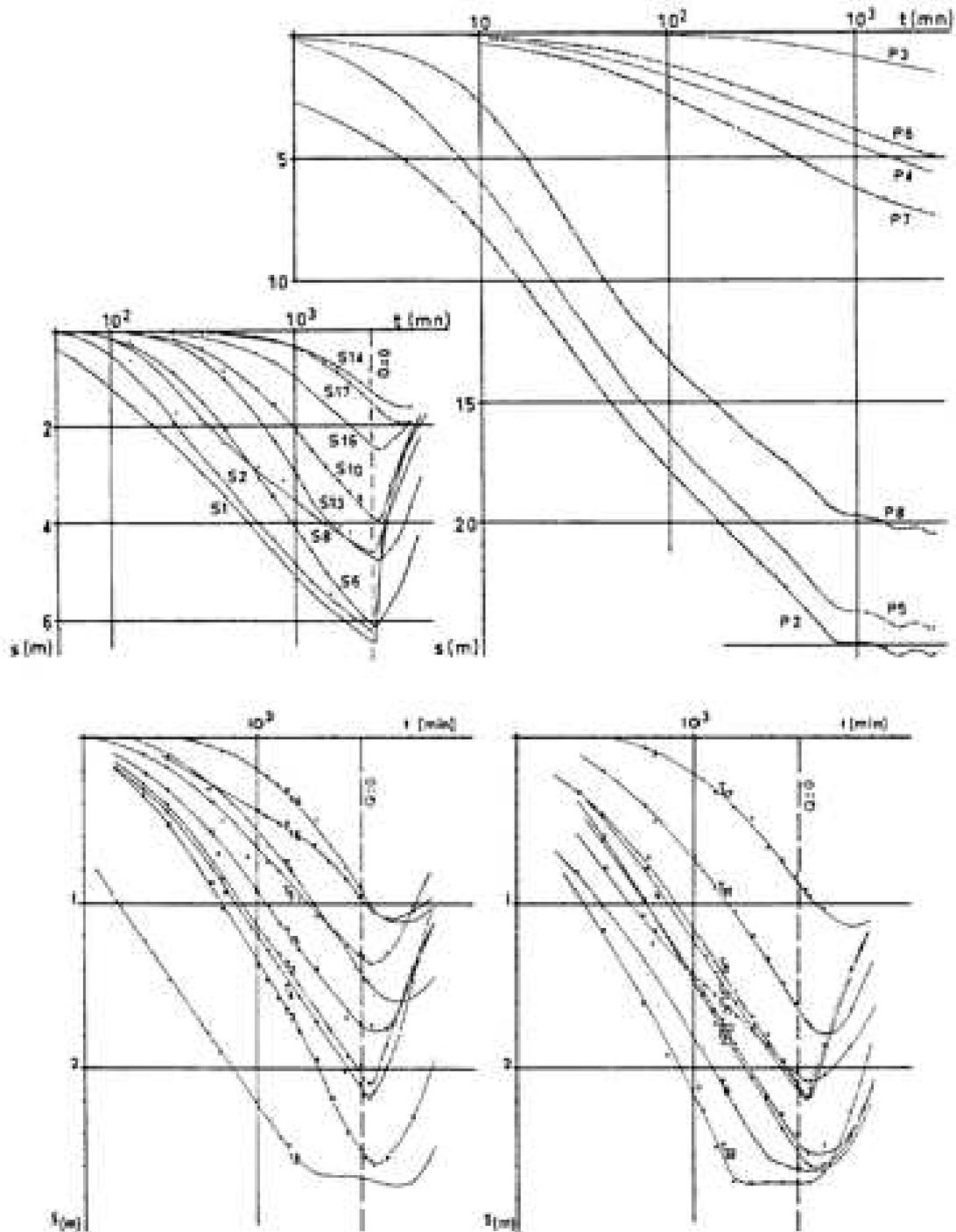


Figure 8 - Site expérimental de Yamoussoukro. Courbes de rabattement dans les ouvrages P, S et T. Pompage d'avril 1982 dans P2

V. CONCLUSION : SCHEMA GENERAL D'ORGANISATION ET DE FONCTIONNEMENT

Les informations obtenues ainsi après des travaux effectués à des échelles métriques à kilométriques, souvent à l'aide de sites expérimentaux (Faillat et Drogue, 1987; Somlette, 1998; Faillat et Drogue, 1993; Engalenc, 1978-1979), conduisent à proposer un schéma d'organisation et de fonctionnement d'hydrogéosystèmes bicouches à forts contrastes hydrodynamiques, propre aux régions de socle, conceptualisé dès les années soixante-dix (Engalenc, 1978-1979). Dans ce schéma, les formations superficielles meubles, principalement des altérites, de nature, de mise en place et de caractéristiques particulièrement variées, reposent sur un soubassement de roches dures comportant des réseaux de fissures hydrauliquement actives, plus ou moins régulièrement distribuées, résultat de la superposition des effets de phénomènes générateurs de discontinuités, principalement d'origine tectonique (fractures à forts pendages). Altérites et roches dures constituent un ensemble assimilable à un aquifère bicouche du type drain (la roche dure fissurée) - capacité (les formations meubles superficielles, avec à la base, dans le cas des roches massives, des blocs de roches dures emballées dans les altérites). Le drain, fortement diffusif, permet des écoulements relativement importants et transmet rapidement et loin l'influence des pompages, suivant certaines directions préférentielles. La capacité, faiblement diffusive, fournit l'essentiel des volumes d'eau exploitables, provenant des pores d'interstices à un rythme lent, compensé par une surface d'échange importante.

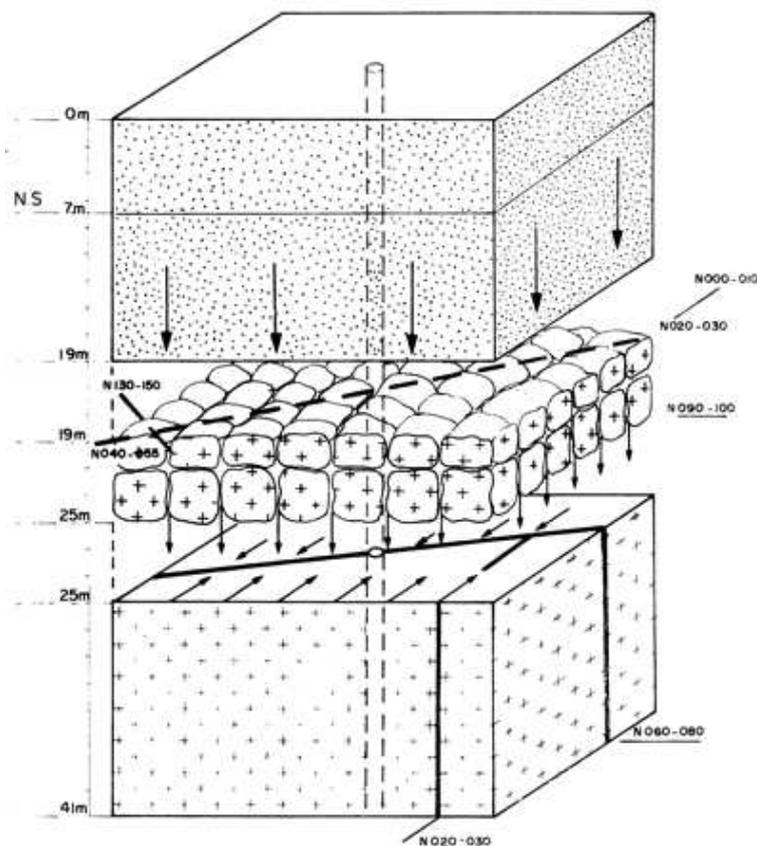


Figure 10 - Schéma d'organisation et de fonctionnement du site expérimental de Zigla Kouplélé (Burkina Faso), composé de 1 forage de 41,5 m et de 3 piézomètres de 16 à 26 m de profondeur, distants de 5,2 à 10,05 m du forage, dans des granito-gneiss (Engalenc, 1979)

C'est la complémentarité des composants de ce système qui en fait l'efficacité hydrodynamique, l'influence des pompages étant propagée largement par le réseau de fissures, ce qui permet l'accès aux ressources en eau emmagasinées dans les altérites, où qu'elles soient. La disponibilité du matériel de forage approprié a logiquement orienté, depuis le milieu des années soixante-dix dans les pays francophones, vers l'exploitation des ressources en eau du socle par l'intermédiaire des réseaux de fissures hydrauliquement actives, comme le feraient les drains d'un puits à drains rayonnant, mais de façon plus efficace et économique. Le succès des recherches d'eau en zones de socle suppose de ne négliger aucun des termes de ce schéma, notamment les champs de fissures qu'il faudra caractériser au mieux en ce qui

concerne leur distribution spatiale, notamment en profondeur ou suivant certaines directions privilégiées, ainsi que les poches ou les couloirs d'altération qui leur sont subordonnés.

Références bibliographiques :

Assouma D. (1982).- Analyse statistique des facteurs influençant la productivité des forages hydrauliques en région de socle au Togo. *D.E.A. univ. d'Orléans*, 89 p.

Burgéap (1971).- Etude comparative des avantages respectifs des puits et forages dans les régions à substratum cristallin d'Afrique de l'Ouest. *C.I.E.H., série hydrogéologie*, Ouadougou, Haute-Volta

Cairon D. (1981). Etude sur les forages d'eau de la Boucle du Cacao. *D.M.G.*, Abidjan, Côte d'Ivoire, 54 p., Ann.

Engalenc M. (1978-1979).- Méthode d'étude et de recherches de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. *C.I.E.H., Ouagadougou et Géohydraulique, Maisons-Alfort*, T. 1, 318 p. et T. 2, 193 p.

Faillat J.P. (1985). Synthèse et commentaires d'études de forages en zone de socle fissuré éruptif et métamorphique, principalement en Afrique. *110^e Congrès national des Sociétés savantes*, Montpellier, 1985, sciences, fasc. VI, p. 317-329

Faillat J.P., C. Drogue C. (1987).- Influence de l'effet d'échelle, de l'hétérogénéité et de la connexité des aquifères fissurés sur la réaction des forages en zone de socle (Afrique de l'Ouest). *Journal of Hydrology*, 90, pp. 159-182

Faillat J.P., Drogue C. (1993). Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Hydrological Sciences Journal*, 38,3, 6/1993, 215-229

Faillat J.P., Dubearnes B., Squarcioni P. (2002).- Représentativité des données obtenues dans les forages en milieu fissuré et erreurs d'interprétation. *1^{er} Colloque sur les Sites et Sols Pollués, bilan et perspectives*. ADEME, Paris, 12-13 décembre 2002, communication orale, actes sur disque, 6 p.

Omorinbola E.D. (1982). Verification of some geohydrological implications of deep weathering in the basement complex of Nigeria. *J. Hydrology*, 56, 347-368

Somlette L., (1998).- Contribution à l'étude hydrogéologique de la distribution et du devenir des nitrates dans les nappes de fissures, de l'échelle du périmètre expérimental à celle du bassin versant côtier. Conséquences sur les ressources en eaux et la protection du littoral. *Thèse de doctorat*, Université de Bretagne Occidentale, ISAMOR, 308 p.

P1-5

Modèle hydrogéologique conceptuel des formations métamorphiques de la Corse alpine à partir d'une approche pluridisciplinaire et multi-échelle

**M. Genevier¹, N. Frissant¹, B. Dewandel², C. Allanic³, R. Wyns³, B. Ladouche²,
Y. Caballero², A. Coulon**

(1) BRGM Corse, (2) BRGM D3E/Montpellier, (3) BRGM DGR
m.genevier@brgm.fr

Les formations métamorphiques de la Corse alpine se caractérisent par un ensemble complexe de nappes de charriage constituées d'une part d'ophiolites représentées par des metabasaltes, des métagabbros et un ensemble ultramafique de péridotites plus ou moins serpentinisées, et d'autre part par des formations métasédimentaires issues de la couverture sédimentaire océanique jurassico-crétacée qui se caractérisent principalement par des schistes, des calcschistes et des calcaires plus ou moins métamorphisés (cipolins).

Les propriétés géologiques et hydrogéologiques de ces formations diffèrent de celles des aquifères de socle granitique. Un modèle hydrogéologique conceptuel de ces aquifères a été développé à partir des résultats d'une approche pluridisciplinaire à différentes échelles spatiales, du contact lithologique (quelques mètres) à l'échelle du bassin versant (plusieurs dizaines de kilomètres carrés).

La circulation des eaux souterraines au sein des massifs de la Corse alpine et la localisation des aquifères sont déterminés à la fois par la lithologie et la tectonique. L'analyse de l'évolution du débit air-lift à l'avancement de la foration d'une soixantaine de forages a mis en évidence que la zone fracturée productive est généralement comprise entre 0 et 40 m de profondeur et s'étend jusqu'à 70 – 80 m dans les formations de schistes et calcaires. L'étude de la répartition et de la localisation des sources ainsi que les campagnes de jaugeages différentiels des cours d'eau à l'étiage ont permis d'identifier les formations les plus aquifères et les formations pouvant jouer le rôle de substratum imperméable favorisant l'émergence. Les formations issues du cortège ophiolitique telles que les gabbros, les metabasaltes ou les serpentinites présentent des conductivités hydrauliques minimales très proches comprises entre 1.10^{-8} et 2.10^{-8} m/s. Cette homogénéité des valeurs traduit la présence d'aquifères fissurés au fonctionnement plus « classique » à rapprocher des massifs de granitoïdes. Les conductivités hydrauliques minimales des formations de schistes et calcaires présentent a contrario une certaine variabilité, pouvant varier d'un rapport de 1 à 5 et être supérieure à celles des formations ophiolitiques. Ces observations traduisent le caractère hétérogène et compartimenté des aquifères qui se développent dans ces formations. Les passages plus carbonatés (bancs de cipolins, calcschistes, calcaire marmoréen) peuvent être le siège de phénomènes de dissolution qui augmentent localement la perméabilité de la formation. Cette hétérogénéité implique également l'existence de bassins souterrains différents des bassins de surface dans ces formations.

P1-6

Typologie des sources de deux districts du Sud-Ouest du Rwanda

A.Gutierrez⁽¹⁾, V.Mardhel⁽²⁾, J.L. Lavalade⁽³⁾

(1) BRGM – BP6009 – 45370 Orléans ; a.gutierrez@brgm.fr

(2) BRGM - Ester, 87280 Limoges ; v.mardhel@brgm.fr

(3) SKAT – Bujumbura. Actuellement à ANTEA, 29 Av. Aristide Briand ; 94110 Arcueil

Le programme PEPP (Programme Eau Potable pour la Population des Grands Lacs), financé par la coopération Suisse (DDC) vise à alimenter les populations rurales dans les pays riverains CONGO-RDC, RWANDA et BURUNDI. Dans cet objectif, SKAT, ONG suisse, a constitué une base de données des sources sur deux districts du Rwanda : les districts de Rusizi et de Nyamasheke au Sud-Ouest du pays.

Les terrains constituant le sud-ouest du Rwanda sont constitués de formations précambriennes (socle) et tertiaires (basaltes). La synthèse réalisée à partir de l'inventaire de 2400 sources fait apparaître plusieurs caractéristiques :

- L'analyse géomorphologique de la position des sources par rapport au relief conduit à proposer la typologie suivante :
 - sources d'altérites : En tête de bassin versant, proche du sommet des collines ce sont des sources de faible débit et généralement faible conductivité
 - sources de piémont : En pied de colline, au niveau des ruptures de pente, ces sources drainent la zone fissurée et les altérites de la colline.
 - sources alluviales : situées à proximité du lit des rivières, dans l'axe des vallées ces sources drainent principalement les alluvions de ces vallées (qui elles même drainent les piémonts des collines). Les conductivités y sont plus élevées.

- L'analyse des débits, des conductivités et des pH des sources montre que le substratum géologique exerce un contrôle complémentaire à la géomorphologie. Dans le domaine volcanique quelques sources sont thermales.

Les projets AEP des populations rurales se heurtent à l'absence d'information sur les sources, principale ressource en domaine de socle. Une méthodologie est proposée pour sélectionner des points d'intérêts selon divers critères, afin de constituer un réseau de suivi à l'image des réseaux patrimoniaux présents dans de nombreux pays. La démarche est adaptée aux données disponibles dans l'inventaire.

Références bibliographiques :

Gutierrez A., Mardhel V. (2015) – Sources des districts de Rusizi et Nyamasheke (Rwanda). Typologie ; Critères pour un réseau de suivi. Rapport final. BRGM/ RC-6443-FR, 42 p., 22 ill.

P1-7

Les aquifères de socle en Basse-Normandie

Alexandra Laurent ⁽¹⁾, **Maurice Freslon** ⁽²⁾

⁽¹⁾ BRGM Basse-Normandie, ⁽²⁾ DDTM Manche
a.laurent@brgm.fr, maurice.freslon@manche.gouv.fr

L'objectif de ce travail est de présenter les capacités aquifères des formations de socle sur le territoire Bas-Normand en mettant en évidence leurs variabilités lithologiques et hydrogéologiques.

Le domaine de socle en Basse-Normandie correspond au rebord nord-est du massif Armoricaire, caractérisé par des terrains d'âge précambrien et paléozoïque (-670 à -295 Ma), plus ou moins déformés et structurés au cours des orogénèses icartienne, cadomienne et varisque. Ils comportent des intrusions volcaniques cambriennes et des plutons granitiques, ayant métamorphosé les terrains en place en cornéennes, schistes tachetés et gneiss. A l'est (Calvados et Orne), les formations carbonatées d'âge jurassique et crétacé de la bordure occidentale du bassin de Paris viennent recouvrir les terrains du massif Armoricaire.

Les formations de socle en Basse-Normandie présentent des potentiels aquifères non négligeables, qui se manifestent à travers le soutien aux débits d'étiage des cours d'eau et qui diffèrent selon la nature des roches. On distingue :

- **Les granites et auréoles de métamorphisme** : dans le sud-Manche les complexes granitiques peuvent fournir des débits atteignant 50 m³/h dans le massif de Vire (ex : Vengeons) et dans les schistes tachetés en bordure du massif d'Avranches (ex : St-Loup).
- **Les roches métasédimentaires** (schistes, grès, siltites) : constituent la majeure partie du socle bas-normand, notamment dans le Nord Cotentin, avec le Val de Saire (débit de 20 à 30 m³/h), ou la zone du synclinal de Siouville (débit de 50 m³/h et transmissivité de 10⁻³ m²/s).
- **Les roches volcaniques** : zones moins étendues, qui affleurent au nord de Coutances, où la formation de Montsurvent révèle des débits supérieurs à 30 m³/h (ex : La Vendelée).

Dans les aquifères de socle, les arrivées d'eaux profondes (30-100 m) sont généralement de bonne qualité protégées des pressions anthropiques, avec un développement des phénomènes de dénitrification. Néanmoins la présence d'éléments géogéniques, tels que le fer et le manganèse, et parfois l'arsenic et/ou l'antimoine (ex : Couville, secteur nord de Coutances), peut contraindre la mise en exploitation de la ressource.

Dans la Manche, afin d'optimiser l'équipement des forages dans le socle, une solution technique originale (tube suspendu sans soudures) a été mise en place dans plusieurs ouvrages afin d'une part de simplifier l'entretien et d'autre part de limiter le développement bactérien.

P1-8

Les aquifères de socle sont aussi des réservoirs pétroliers

Robert Wyns

BRGM-ISTO, UMR 7327, BP 36009, 45060 Orléans cedex02

r.wyns@brgm.fr

Depuis les débuts de l'exploration pétrolière par forages au 19^{ème} siècle, de très nombreux indices d'hydrocarbures ont été rencontrés dans les roches plutoniques, métamorphiques ou volcaniques. Des puits forés dans ces lithologies à priori peu favorables se sont révélés productifs, et de nombreux gisements de ce type ont été mis en exploitation.

Les caractéristiques communes à tous ces gisements d'hydrocarbures (huile ou gaz), onshore ou offshore, sont un contexte structural en horsts et grabens, la roche mère (sédimentaire) étant en position effondrée, et le réservoir situé au toit du socle en position soulevée, sous une couverture sédimentaire imperméable.

Les lithologies des réservoirs comprennent des granites, des granodiorites, des gneiss et des micaschistes, toutes roches riches en minéraux gonflants (biotite), et quelques roches ultrabasiques. Les cuttings montrent systématiquement des minéraux altérés, et les données de diagraphie indiquent une intense fracturation. L'extension latérale des gisements (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de km²) et l'épaisseur de la zone imprégnée (quelques dizaines à quelques centaines de mètres) indiquent que le réservoir fissuré est stratiforme : il s'agit de l'horizon fissuré d'anciens profils latéritiques contemporains du bombement anté-rift, enfouis sous les sédiments. Chaque année, l'exploration pétrolière offshore des marges continentales fait état de nouvelles découvertes d'hydrocarbures dans des roches métamorphiques ou plutoniques : il s'agit généralement de têtes de horsts ou de blocs basculés sur la partie amincie de la marge.

Les gisements sont répartis sur l'ensemble du globe [1] : on peut citer les gisements d'huile et de gaz du Golfe de Suez (Egypte), le gisement de Kharir au Yémen, les gisements du sud du Vietnam, les gisements ou indices d'Argentine, des Shetlands (nord de la Grande Bretagne), du Brésil, du Canada, du Chili, de Chine, de Cuba, du Tatarstan, de Géorgie, du Kazakstan, du Groenland, d'Inde, d'Indonésie, du Japon, de Corée, de Libye, du Mexique, de Namibie, du Maroc, de Norvège, de Nouvelle Zélande, de Yougoslavie, de Roumanie, de Hongrie, de Russie, de Thaïlande, de Californie, du Kansas, d'Arizona, du Nevada, d'Oklahoma, de Pennsylvanie, d'Utah, du Texas, du Venezuela.

La taille des gisements dans les formations de socle est comparable à celle des gisements en formations sédimentaire (plusieurs milliards de barils extractibles).

Outre gisements situés dans des roches métamorphiques ou plutoniques, il existe également de nombreux gisements en formations volcaniques : basaltes, tuffites, volcanites acides.

Références bibliographiques :

[1] GeoScience Limited, 2012 – Hydrocarbon production from fractured basement formations, *Version 10*, 43 p.

P1-9

Les formations de socle pyrénéennes : potentialité et interactions entre aquifères - Exemples ariégeois

**Maritxu Saplairoles(1), Jean-Marie Gandolfi(1), Bernard Monod(1),
Robert Wyns(2),**

(1) BRGM, Direction régionale Midi-Pyrénées, 3 rue Marie Curie, 31527 Ramonville-Saint-Agne

(2) BRGM, Centre scientifique et technique, 3 av. Claude Guillemin, 45060 Orléans

Le modèle actuel d'aquifère de socle [1, 2] correspond à un aquifère multicouche composé par deux horizons du profil d'altération : les altérites meubles et l'horizon fissuré. La présence d'une nappe est donc étroitement liée à la capacité des formations de socle à développer un réseau de fissures dans la partie profonde du profil d'altération (horizon fissuré), et à la préservation de celui-ci au cours de l'histoire géologique. La méthodologie mise en place pour évaluer le potentiel aquifère s'appuie sur de nombreuses investigations de terrain, permettant de réaliser en premier lieu une étude géomorphologique des surfaces d'altération et d'identifier le degré d'altération des minéraux. Elle a été menée en région Midi-Pyrénées sur les formations de socle du Massif central et a permis d'établir une carte d'altérabilité et de potentialités aquifères (Projet POTAMAC, [3]). Un travail similaire est engagé depuis 2013 dans le massif des Pyrénées (projet POTAPYR) et vise à établir une typologie des formations géologiques de la chaîne en termes de potentialités aquifères.

Les reconnaissances géologiques de l'ensemble des formations de socle ont permis de dresser une première carte de capacité des formations à développer un profil d'altération. La complexité géologique des Pyrénées nécessite de réaliser des approches hydrogéologiques à l'échelle de massifs intégrant l'ensemble des formations (socle mais aussi karstique, fluvio-glaciaire, ...). Ces travaux s'appuient sur des reconnaissances de terrain systématiques (conditions d'émergences, débits des sources, voire des cours d'eau, existence ou non d'anomalies de température,...). Les résultats obtenus seront restitués, à l'échelle régionale (1/250 000), sous la forme d'un atlas hydrogéologique par massif.

A la différence du projet POTAMAC, les formations pyrénéennes de socle, hormis certains massifs granitiques, ne semblent pas offrir de réelles potentialités aquifères au sens de l'exploitabilité (vidange rapide des aquifères, profil d'altération fortement tronqué). En revanche, elles jouent un rôle prépondérant, dans le soutien d'étiage des rivières (rôle de retardateur) mais aussi dans les interactions avec les autres formations plus perméables (glaciaires par exemple) qui constituent alors un réceptacle des eaux issues du massif, et forment un aquifère à fort potentiel.

Références bibliographiques

[1] Wyns R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legchenko A.V., Vairon J., Mathieu.F. (2004) Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), *Bulletin de la Société Géologique de France*, t.175, vol. 1, p. 21-34

[2] Lachassagne P., Wyns R., Dewandel B. (2011) - The fracture permeability of hard rocks aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23, 145-161

[3] Gandolfi J.M., Wyns R., Damy P.C. (2010) - Diagnostic des potentialités aquifères des formations de socle en région Midi-Pyrénées. Rapport final. Rapport BRGM/RP-58808-FR. 137 p., 58 ill., 6 ann., 4 Planches hors texte.

P1-10

Examen des potentialités en eau souterraine du socle vendéen semi-profond en vue de l'alimentation en eau potable sur le territoire du Syndicat du Val de Loire (Deux-Sèvres)

C.F. Moreau, O. Gélé, V. Collin

HYGEO Eau et Environnement

accueil@hygeo.fr

Le Syndicat du Val de Loire (SVL) regroupant 73 territoires communaux du nord du département des Deux-Sèvres a souhaité connaître les potentialités en eau souterraine sur son territoire et sa bordure extérieure, en vue du renforcement et de la sécurisation de son alimentation en eau potable.

9 forages de reconnaissance en terrain cristallin ont été réalisés dans ce but en 2011 et 2013, après études géologiques, hydrogéologiques et géophysiques préalables, explorant l'aquifère du socle granitique et dioritique vendéen jusqu'à 200 m de profondeur.

4 forages se sont révélés improductifs au soufflage en fin de foration (débit < 1m³/h) et ont été rebouchés dans les règles de l'art.

Le forage de reconnaissance F4 est en mesure de fournir un débit de 14 m³/h sans dénoyage des principales arrivées d'eau situées entre 142 et 145 m de profondeur. L'eau est assez minéralisée, exempte de nitrates, pesticides et autres micropolluants organiques, mais la présence de manganèse, fer et arsenic nécessite un traitement préalable avant distribution.

Les forages de reconnaissance F8 et F9 sont en mesure de fournir chacun un débit de l'ordre de 100 m³/h, avec toutefois des interférences inter-ouvrages importantes. De minéralisation très élevée, l'eau présente une qualité non conforme à la réglementation en vigueur vis-à-vis de la consommation humaine pour les paramètres chlorures, sodium et sulfates et pour les indicateurs de radioactivité. Elle contient aussi du fer, du manganèse, des fluorures et du bore. Une reprise par rebouchage partiel étanche du fond des ouvrages (68 m pour F8, 71 m pour F9), à l'appui de diagraphies gamma-ray, résistivité, micromoulinet, conductivité et température, suivie de pompages individuels puis simultanés de 72 heures avec enregistrement des paramètres niveau, débit, conductivité et température, a conduit à des résultats similaires.

Les forages de reconnaissance F11 et F12 sont en mesure de fournir des débits respectifs de 30 et 25 m³/h avec des rabattements élevés pour F11 et significatifs pour F12 mais restant acceptables et sans dénoyage des principales arrivées d'eau, identifiées à partir de 120 m pour F11 et 70 m pour F12. L'eau est assez minéralisée, exempte de pesticides et autres micropolluants organiques, sans dépassement de limite de qualité pour les eaux brutes destinées à la consommation humaine. Des pompages de longue durée (3 mois) ont montré la stabilité des paramètres conductivité, fer, manganèse et aluminium, et permettent d'envisager l'exploitation de ces forages pour la consommation humaine.

P1-11

Les fractures polygonales kilométriques des grands massifs granitiques sont elles des fentes de refroidissement magmatique ?

Robert Wyns

BRGM-ISTO, UMR 7327, BP 36009, 45060 Orléans cedex02

r.wyns@brgm.fr

La surface topographique recoupant les grands batholites granitiques (superficies de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés) présente très fréquemment des thalwegs dessinant des structures polygonales de taille kilométrique. Ces thalwegs correspondent à la trace en surface de systèmes de fractures subverticaux bien visibles sur les profils de résistivité électrique ; ils se rejoignent sur des points triples selon des angles voisins de 120°. Ces systèmes de fractures verticaux, et notamment les points triples, constituent souvent des cibles pour l'implantation de forages de recherche d'eau. D'un point de vue géomorphologique, ils peuvent délimiter des dômes granitiques déchaussés par l'érosion (« demi-oranges ») sans que des variations lithologiques permettent d'expliquer l'origine de ces dômes.

On sait que dans les coulées basaltiques le débit polygonal ("orgues basaltiques") résulte du retrait thermique de la lave lors de son refroidissement. Les prismes sont perpendiculaires aux surfaces de refroidissement et leur diamètre est proportionnel à la vitesse de refroidissement : ainsi, dans une coulée épaisse, le diamètre des prismes augmente depuis la surface vers le cœur de la coulée.

Dans un batholite granitique la vitesse de refroidissement est lente et dépend d'une part de la température de l'encaissant et d'autre part de l'épaisseur de la lame granitique, qui est généralement de plusieurs kilomètres.

Les fractures polygonales kilométriques des grands batholithes granitiques pourraient donc correspondre, par analogie avec les prismes basaltiques, à des fentes de retrait thermique résultant du refroidissement du batholithe et recoupées par la surface topographique actuelle. Lors de l'altération supergène, ces fentes constitueraient des voies de pénétration privilégiées de l'altération qui provoquerait une arénisation profonde. Leur mode de formation peut expliquer leur intérêt en hydrogéologie puisque qu'il s'agirait, avant leur arénisation éventuelle, de systèmes de fractures ouvertes.

P1-12

Une méthodologie pour régionaliser la perméabilité d'un aquifère fracturé à partir de cartes piézométriques détaillées : exemple d'un aquifère péridotitique en Nouvelle-Calédonie

Benoît Dewandel⁽¹⁾, Julie Jeanpert⁽²⁾, Bernard Ladouche⁽¹⁾, Jean-Christophe Marechal⁽¹⁾, Jean-Lambert Join⁽³⁾

(1) BRGM, D3E/NRE; b.dewandel@brgm.fr

(2) Service Géologique de la Nouvelle-Calédonie - DIMENC

(3) Université de la Réunion

Bien qu'il soit relativement facile d'estimer les propriétés hydrodynamiques d'un aquifère à une échelle locale, en réalisant par exemple des tests hydrauliques, cela devient beaucoup plus difficile à l'échelle d'un aquifère au sein duquel les variations de ces propriétés peuvent être très importantes. Ceci est d'autant plus vrai dans les aquifères des formations de socle fracturé, où la perméabilité peut varier sur plus de 12 ordres de grandeur.

L'approche proposée ici pour estimer un champ de perméabilité est basée sur le concept que les variations de la surface piézométrique peuvent caractériser des variations des propriétés des aquifères [1]. Une nouvelle méthode, basée sur l'étude du gradient de la piézométrie établi à partir d'une carte très détaillée (69 observations/km²) a été développée et testée sur un aquifère de péridotites situé en Nouvelle-Calédonie (4 km² ; plateau de Tiébaghi).

La méthode utilise des données de terrain : niveaux d'eau, petits essais hydrauliques et diverses observations géologiques. La carte de transmissivité produite est basée sur une relation statistique empirique entre la distribution du gradient de la carte piézométrique, pour lequel l'influence topographique a été enlevée, et la distribution des transmissivités issues de petits tests hydrauliques. Les premiers résultats montrent que dans environ 70% des cas la valeur de transmissivité estimée par la carte possède un écart inférieur à 20% de celle mesurée localement par les tests hydrauliques (LogT±0,5 en moyenne), ce qui compte tenu de la complexité de l'aquifère - la transmissivité varie sur 5 ordres de grandeur - est très raisonnable.

La carte de perméabilité est obtenue par simple transformation de la carte de transmissivité grâce à une cartographie de la base de l'aquifère. Son épaisseur moyenne est de 30 m mais localement peut dépasser 100 m. La carte de perméabilité montre un très fort lien avec les zones de failles et donc la structuration du massif de péridotites. Ces résultats suggèrent que les zones de fractures tendent à être les moins perméables, du moins sur les premières dizaines de mètres, probablement en raison d'une plus forte abondance en matériau très argileux que dans le profil d'altération avoisinant. La carte est également comparée aux observations de terrain montrant un caractère pseudo-karstique [2,3].

Références bibliographiques :

- [1] Dewandel B., J-C. Maréchal, O. Bour, B. Ladouche, S. Ahmed, S. Chandra and H. Pauwels, 2012. Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and efficient porosity at watershed scale in crystalline aquifers. *J of Hydrology*, 416-471, 83-97.
- [2] Join J.-L., Robineau B., Ambrosi J.-P., Costis C., et Colin F. 2005. Système hydrogéologique d'un massif minier ultrabasique de Nouvelle-Calédonie. *Comptes-Rendus Géoscience* 337: 9.
- [3] Genna A., Maurizot P., Lafoy Y., et Augé T. 2005b. Contrôle karstique de minéralisations nickélicifères de Nouvelle-Calédonie. *Comptes-Rendus Géoscience* 337: 367-374.

P1-13

Formation de corrugations hydrothermales lors de l'altération des roches ultramafiques

**Laurent Guillou-Frottier⁽¹⁾, Anicet Beauvais⁽²⁾, Robert Wyls⁽¹⁾, Laurent Bailly⁽¹⁾,
Thierry Auge⁽¹⁾, Anne-Sophie Audion⁽³⁾**

(1) BRGM, ISTO, UMR 7327, Orléans ; (2) Aix-Marseille Université, CEREGE (IRD, CNRS), Aix-en-Provence ; (3) Variscan mines, Orléans

l.guillou-frottier@brgm.fr

During shallow subsurface (< 200 m depth) weathering processes, temperatures may reach several tens of °C as a result of exothermic chemical reactions, such as hydration of olivine in ultramafic rocks or chloritization of biotite in granitic rocks. These mineralogical transformations enhance mineral fracturing, and the growth of fracture networks leads to further reactions and increases the permeability. The subsequent deepening of the weathering front creates new reactions, thus self-maintaining the weathering process over several million years (Myr). For more than 20 Myr, the peridotite massifs of New Caledonia have undergone intense weathering that has produced thick lateritic weathering mantles. The observable undulations of the weathering front and the protrusions of unweathered peridotite, from several meters to several tens of meters high, attest to a corrugated bedrock topography, which may result from inhomogeneous fluid circulation patterns within the coarse, permeable and porous (30-50%) saprolite layer. Combined together, the excess heat (up to $\approx 80^\circ\text{C}$) and high permeability (present-day values reaching $4.3 \times 10^{-13} \text{ m}^2$) within lateritic weathering mantles could potentially trigger hydrothermal convection (buoyancy-driven flow). This was numerically modeled by accounting for temperature-dependent fluid density and viscosity, and for time-dependent and spatially varying parameters simulating the deepening of the weathering front. Modeling the transient evolution of the thermal and flow velocity fields over 20 Myr reveals that hydrothermal convection can be triggered in the weathering lateritic mantles of New Caledonia, even on sloped surfaces where topography-driven flow prevails. Convective cells develop above the weathering front, and the amplitudes of thermal undulations are enhanced when feedback mechanisms between permeability and temperature are accounted for. The models also allow definition of the most probable zones of mineralization and reveal two-dimensional corrugations below which weathering is no longer efficient.

P1-14

Hydrogéologie des Péridotites Karstifiées de Nouvelle-Calédonie

Join J.L.¹, Adler P.², Bouichet G.³, Dewandel B.⁴, Genthon P.⁵, Jeanpert J.⁶,
Ladouche B.⁴, Maréchal J.C.⁴, Maurizot P.⁶, Sevin B.⁶

1 : Univ. Reunion, 2 : Univ Paris6, 3 : Golder, 4 : BRGM, 5 : IRD, 6 : Service Géologique de la
Nouvelle-Calédonie – DIMENC

join@univ-reunion.fr

L'objectif de cette présentation concerne la connaissance de la structure et du fonctionnement hydrogéologique des aquifères des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie qui forment des hydrosystèmes multicouches localisés dans les différents niveaux, ou horizons, du manteau d'altération^[1]. Sur ces massifs miniers exploités pour leurs ressources en Nickel, la roche saine fut longtemps considérée comme le substratum d'un aquifère principal saprolitique. Plus récemment, des observations de terrain ont permis de montrer l'extension de l'écoulement souterrain dans les fractures du socle (Join et al. 2005) avec parfois un caractère pseudo-karstique marqué^[2,3]. Une étude menée sur les massifs de péridotites d'Oman^[4], a montré par ailleurs que la zone de circulation pouvait s'étendre dans ces formations jusqu'à au moins 50 mètres de profondeur.

S'appuyant sur un projet financé par le Centre National de Recherche Technologique (CNRT) sur le "Nickel et son environnement", le programme de recherche « Hyperk » s'attache depuis deux ans à caractériser l'hydrodynamique du socle pour mieux comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème complet. Toutefois, la variabilité des environnements à l'échelle régionale démontre la nécessaire prise en compte d'autres forçages. En particulier, l'évolution géo-structurale et climatique des différents massifs miniers constitue un autre facteur essentiel dont le projet s'attache à définir la contribution. Nous présentons ici les premiers résultats obtenus à la suite d'investigations réalisées sur deux massifs pilotes : le massif de Tiebaghi et le massif de Goro, situés respectivement au nord et au sud de la Nouvelle-Calédonie.

Références bibliographiques :

- [1] Jeanpert J., 2010, Hydrogéologie des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. Bilan des connaissances et hypothèses de travail, Rapp. SGNC-DIMENC. 47 p.
- [2] Join J.-L., Robineau B., Ambrosi J.-P., Costis C., et Colin F. 2005. Système hydrogéologique d'un massif minier ultrabasique de Nouvelle-Calédonie. Comptes-Rendus Géoscience 337: 9.
- [3] Genna A., Maurizot P., Lafoy Y., et Augé T. 2005b. Contrôle karstique de minéralisations nickélifères de Nouvelle-Calédonie. Comptes-Rendus Géoscience 337: 367-374.
- [4] Dewandel B., Lachassagne P., Bourdier F., Al-Hattali S., Ladouche B., Pinault J.-L., et Al-Suleimani Z. 2005. A conceptual hydrogeological model of ophiolite hard-rock aquifers in Oman based on a multiscale and a multidisciplinary approach. Hydrogeology journal 13: 708-726.

SESSION 2

**METHODES D'IMPLANTATION DES FORAGES ET DE CARTOGRAPHIE DES
POTENTIALITES EN EAU SOUTERRAINE EN CONTEXTE DE SOCLE – DE L'ECHELLE
REGIONALE A L'ECHELLE LOCALE**

**METHODS FOR WATER WELL SITING AND FOR MAPPING HRA POTENTIALITIES:
FROM THE REGIONAL TO THE WELL SCALE**

***COMMUNICATIONS ORALES
ORAL COMMUNICATIONS***

Propriétés des aquifères de socle du Bénin: analyse multi-variables et multi-échelles des paramètres de contrôle

Vouillamoz, J.M.⁽¹⁾; Tossa, A.Y.A.⁽²⁾; Chatenoux, B.⁽³⁾; Kpegli, K.A.R.⁽⁴⁾

(1) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, jean-michel.vouillamoz@ird.fr

(2) Direction Générale de l'Eau du Bénin, aureltoss@gmail.com

(3) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, gisinfo@bchate.name

(4) Université d'Abomey-Calavi/Institut National de l'Eau, raoulkpegli@yahoo.fr

Les aquifères de socle occupent environ 80% de la superficie du Bénin. Ils sont exploités pour l'approvisionnement domestique au travers de puits et forages. L'implantation des forages est contractuellement réalisée par des bureaux d'étude après une recherche de linéament (photo-interprétation puis trainés et de sondages électriques). Notre étude vise à vérifier si la fracture d'origine tectonique généralement recherchée contrôle effectivement le succès et les propriétés des forages.

Nous avons dans un premier temps calculé les propriétés des forages et estimé les propriétés des aquifères de socle à l'échelle nationale du Bénin (87 000 km²). Nous avons ensuite défini une fenêtre d'étude de 27 000 km² dans laquelle les propriétés des forages ont été analysées au regard de leurs coordonnées géographiques et des unités géologiques du socle. Enfin, nous avons étudié à l'échelle du site (de 1 à 10 km²) les relations entre les propriétés des forages et des aquifères

L'analyse statistique basée sur 3,415 forages retenus dans la banque de données intégrée du Bénin indique que 40% des forages implantés dans le socle par photo-interprétation et géophysique électrique sont négatifs, et que seuls 17% des forages ont un débit instantané supérieur à 3,6m³/h. Les niveaux productifs sont situés dans l'altération non-consolidée et dans les premiers mètres d'épaisseur de l'altération consolidée (zone fissurée/altérée). A l'échelle régionale (1,203 forages), l'épaisseur d'altération non-consolidée contrôle le taux de succès des forages mais également les débits spécifiques, alors que la densité de linéaments ne semble pas influencer sur la productivité des forages. Enfin, à l'échelle du site, implanter un forage à proximité d'un linéament ne permet pas d'augmenter les chances de réaliser un forage positif mais semble permettre d'obtenir une productivité instantanée (débit spécifique) plus élevée.

L'ensemble de ces observations indique que les aquifères se sont essentiellement développés à la faveur des processus d'altération agissant depuis la surface du sol plutôt que depuis la fracturation tectonique. Aussi, la stratégie d'implantation actuellement utilisée pourrait être révisée et recentrée sur la recherche d'altération non-consolidée la plus épaisse et la moins argileuse possible [1], [2].

Références bibliographiques :

[1] Allé, C.; Descloitres, M.; Vouillamoz, J.M.; Yalo, N.; Lawson, M.; Adihou, C., (2015). Caractérisation des aquifères de socle par la résistivité électrique: pratique de l'implantation des forages et perspectives d'amélioration au Bénin. « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015.

[2] Lawson, F.M.A.; Vouillamoz, J.M.; Yalo, N.; Descloitres, M., (2015) Application de la Résonance Magnétique Protonique à la caractérisation des aquifères de socle: exemple du Bénin. « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015.

Cartographie régionale au 1/250 000 de l'épaisseur des altérites et de l'horizon fissuré utile (projet SILURES Bretagne)

Bruno Mougin ⁽¹⁾

(1) BRGM - Direction des Actions Territoriales - Direction Régionale Bretagne - Rennes Atalante
Beaulieu - 2, rue de Jouanet - 35700 Rennes - France

b.mougin@brgm.fr

Le projet « SILURES Bretagne » (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines) s'est déroulé de 2002 à 2008, et il a permis la création d'une base de données sur les eaux souterraines couvrant l'ensemble de la région Bretagne. Celle-ci permet d'améliorer la gestion des ressources en eau souterraine de la région. SILURES Bretagne a été financé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, la Région Bretagne, les Conseils Généraux des Côtes d'Armor, du Finistère, d'Ille-et-Vilaine et du Morbihan, le Syndicat Mixte de Gestion du fonds pour l'eau potable en Ille-et-Vilaine, et le BRGM.

En s'appuyant sur les bases du schéma conceptuel des aquifères de socle [1], les données de près de 12 000 ouvrages de la Banque de données du Sous-Sol ont été interprétées (profondeur, géologie du terrain rencontré, débits instantanés obtenus en foration). Ce travail a abouti à une cartographie au 1/250 000 de l'épaisseur des altérites en place et de l'épaisseur de l'horizon fissuré utile sur la région Bretagne [2].

La première carte a été obtenue par différence entre le Modèle Numérique de Terrain (pas de 250 m) et l'altitude de la base des altérites. Cette altitude a été construite par krigeage, après étude géostatistique d'une population de forages ayant recoupé l'interface altérites/horizon fissuré.

La seconde carte correspond à l'épaisseur du sous-sol riche en fissures (provenant de l'altération des roches) qui apporte la meilleure productivité en termes de débits instantanés. Suites à deux régressions linéaires (débit moyen du quartile supérieur / débit du milieu fissuré utile ; krigeage du débit instantané obtenu en foration rapporté à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles / calcul du débit linéaire du milieu fissuré utile), l'épaisseur du fissuré utile a été déduite à partir du rapport des deux paramètres : débit du milieu fissuré utile (en m³/h), et débit linéaire du milieu fissuré utile (en m³/h/m).

Les cartes régionales au 1/250 000 permettent de visualiser la répartition géographique et en profondeur des deux aquifères de socle (altérites et horizon fissuré) qui contraignent la vitesse de circulation des eaux de pluies infiltrées dans le sous-sol puis des eaux souterraines jusqu'aux rivières bretonnes.

Références bibliographiques :

[1] WYNS, R., J. M. BALTASSAT, P. LACHASSAGNE, A. LEGCHENKO, J. VAIRON and F. MATHIEU, Application of Magnetic Resonance Soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), Bulletin de la Société Géologique de France t. 175 (1) (2004) 21-34.

[2] B. MOUGIN, D. ALLIER, R. BLANCHIN, A. CARN, N. COURTOIS, C. GATEAU, E. PUTOT, collaboration J-P. JEGOU, P. LACHASSAGNE, P. STOLLSTEINER et R. WYNS (2008) - SILURES Bretagne - Rapport final - Année 5 - BRGM/RP-56457-FR

Cartographie & Validation des Potentialités en Eaux Souterraines en Domaine de Socle sous Climat Tropical : Exemple du Burundi

Jean-Marie Barrat (JMB_Concult) barratjm@gmail.com , avec la collaboration de
Alexis Gutierrez (BRGM) a.gutierrez@brgm.fr

Le Burundi, petit pays de l'Afrique de l'Est avec moins de 28 000 km² près de l'équateur a un relief accidenté à des altitudes variant entre 772 (rift) et 2 670 m. Les précipitations et des températures sont liées à l'altitude et sont comprises respectivement de 700 à 2200 mm et 23°C à 17°C.

Sur le plan géologique, le Burundi est constitué à 90% de roches précambriennes, de type granites, schistes et quartzites, avec des formations alluviales dans les vallées et dans les plaines d'effondrement liées au rift est-africain.

Les données et informations disponibles dans le domaine de l'hydrogéologie sont très rares et peu fiables : en effet, fin 2010, hormis les cartes géologiques au 1/100 000^{ème}, seulement une trentaine de forages étaient recensés dans le socle.

La méthodologie développée pour la cartographie des ressources en eaux souterraines à l'échelle du 1:250,000^{ème} [Barrat et al., 2011] a conduit à la numérisation d'une approche dite « à dire d'experts » basée sur une campagne de reconnaissance hydrogéologique par des levés de terrain au 1/25,000^{ème}. Ensuite un modèle a été développé, fondé sur une approche géomorphologique et l'exploitation d'unités fonctionnelles pour l'élaboration d'une carte des « potentialités en eaux souterraines ». Les entités hydrogéologiques produites sont des objets potentiellement aquifères et exploitables par forage, subdivisés en 5 classes : $Q < 0.1$ l/s ; $0.1 < Q < 0.3$ l/s ; $0.3 < Q < 1$ l/s ; $1 < Q < 10$ l/s ; $Q > 10$ l/s.

Une validation de cette carte des potentialités a été effectuée par une campagne de 14 forages de reconnaissance en 2013-2014 [Barrat, 2014] et plusieurs forages d'exploitation. Les résultats ont permis de confirmer les hypothèses de travail de cartographie. Ainsi :

- Les altérites des granites de Kirundo (jusqu'à 100m d'épaisseur) sont très aquifères et peuvent fournir des débits d'exploitation jusqu'à 20 m³/h avec T variant de $2E^{-4}$ à $6E^{-3}$ m²/s et S voisin de $5E^{-4}$.

- Dans les formations schisto-quartzitiques de Gitega, où la fracturation y est prédominante, les débits des forages sont de plusieurs dizaines de m³/h avec T variant de $1E^{-3}$ à plus de $1E^{-2}$ m²/s.

- Les formations sédimentaires en bordure du rift sont très productives avec T voisin de $2E^{-3}$ m²/s.

Malgré la faiblesse du nombre de points de contrôle, il y a une bonne validation de la carte des potentialités. Les résultats ont mis en relief l'importance des **zones faillées**.

Références principales :

- [1] Barrat J.M., Forages de Karusi (Burundi) - Interprétation des pompages, 2014, JMB_Concult
- [2] Barrat J.M., Supervision des opérations de construction de piézomètres dans les communes de Kirundo, Gitega et Rumonge au Burundi, 2014, JMB_Concult
- [3] Barrat J.M., Mardhel V., Gutierrez A., Pinson S., Buscarlet E., Lallier S., 2011 : Programme Sectoriel Eau – Burundi - Cartes des Potentialités en Eaux Souterraine. BRGM/RC- 59751-FR

Programme de recherche en eau souterraine dans le socle Vendéen (2003-2013) : synthèse, bilan et optimisations

Elisabeth Macé

Vendée Eau

elisabeth.mace@vendee-eau.fr

En 2000, Vendée Eau a réalisé une étude prospective sur l'alimentation en eau potable de la Vendée dans le but de connaître plus précisément le niveau de sécurité de la desserte en eau potable actuelle et à l'horizon 2015. Cette étude a été actualisée en 2004 suite à la sécheresse de 2003 en portant ces perspectives à 2025.

Cette étude a mis en avant des risques de manque d'eau dès à présent notamment sur le secteur côtier en cas de crise hydrologique et des déficits prévisibles en 2025 sur ce même secteur et la zone Centre Nord.

Afin de faire face à ces déficits, Vendée Eau a adopté le 5 novembre 2004 un plan de sécurisation permettant de mettre en œuvre différentes solutions : économie d'eau, transferts d'Est en Ouest, création d'une nouvelle retenue et mobilisation de nouvelles ressources en eau souterraine...

Dans le cadre de cette dernière solution, des études réalisées par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) en 1999 et 2000 sur l'ensemble du socle vendéen ont fait ressortir les potentialités aquifères du massif granitique de La Roche sur Yon, des schistes de Nieul Le Dolent et du Granite de Pouzauges. Des études plus précises sur les granites de La Roche sur Yon et ceux d'Avrillé ont été menées en 2002 afin de définir les zones aquifères intéressantes. Elles ont permis de délimiter des secteurs favorables à la recherche en eau souterraine sur 26 communes dans ces formations géologiques.

A partir de 2003, Vendée Eau a donc lancé une vaste campagne de recherche en eau souterraine sur le granite de La Roche sur Yon réparti sur une surface de 1 100 km² en réalisant plus 60 forages de reconnaissance.

Ces phases de reconnaissance hydrogéologique sont l'aboutissement d'une démarche préalable importante soumise à de nombreuses difficultés humaines, administratives et/ou techniques : accord amiable et conventionnel difficile à obtenir sur les parcelles concernées, rencontre et sensibilisation des acteurs locaux (mairie, agriculteurs, propriétaires, ...) chronophages sans certitude d'obtenir d'accords de passage, résultats des sondages de reconnaissance souvent décevants aux regards des investigations, ...

Cette présentation est une synthèse complète (statistiques, limites et optimisations) des 2 programmes de recherche en eau souterraine que Vendée Eau a menée sur le département de la Vendée de 2003 à 2013.

Connaissance de l'aquifère de socle migmatitique de Grand-Santi (Guyane Française)

M. Baisset⁽¹⁾, A. Gutierrez⁽¹⁾, F. Mathieu⁽¹⁾, JM. Gandolfi⁽¹⁾, B. Dewandel⁽¹⁾, A. Boisson⁽¹⁾, L. Bechelen⁽¹⁾
⁽¹⁾BRGM

m.baisset@brgm.fr ; a.gutierrez@brgm.fr ; f.mathieu@brgm.fr ; jm.gandolfi@brgm.fr ;
b.dewandel@brgm.fr ; a.boisson@brgm.fr ; l.bechelen@brgm.fr

La commune de Grand-Santi (Guyane Française) a fait l'objet de deux campagnes de prospection hydrogéologiques dans le socle fracturé [1], [2]). Ces deux études visaient à optimiser l'implantation de forages d'exploitation dans l'aquifère de socle composé de migmatites, ici des granites leucocrates à grains moyens pauvres en micas avec des passages à amphibolites. Dans les deux cas, la même méthodologie basée sur l'étude des linéaments, des anomalies radon, des sondages et des traînés électriques a été employée. En tout, 22 sondages électriques, 23 traînés électriques et 360 prélèvements radon ont permis d'implanter et de réaliser 6 forages (2 en 1996 et 4 en 2014) dont les débits d'exploitation varient de 2,5 à 8m³/h. La roche altérée a été rencontrée sous 20 à 30 m de formations superficielles très peu perméable (alluvions) et la transition avec la roche saine est très rapide (1 à 2 m).

Fin 2014, trois panneaux électriques, ont été réalisés afin d'implanter un ultime forage dont le débit d'exploitation a été estimé à 6m³/h. La roche est rencontrée sous 9 m d'alluvions et est fracturée jusqu'à une vingtaine de mètres mais seule la dernière fracture est aquifère.

En s'appuyant sur les données acquises lors des précédentes campagnes, notamment sur les coupes géologiques des ouvrages exécutés pour calage, ils ont permis de lever de nombreuses interrogations quant à la structure et au fonctionnement de l'aquifère de socle migmatitique de Grand Santi ; les résultats sont les suivants :

- les venues d'eau sont concentrées sur quelques mètres au contact avec la roche (à l'exception près du dernier forage où une fracture profonde fournit 6m³/h)
- l'inspection caméra sur 2 ouvrages (F1, F2) met en évidence des fissures d'ouverture centimétriques isolées dans une roche à priori saine, et localisées dans les 5-10 premiers mètres de roche sous les alluvions (sapolite érodée par le Maroni).
- Pour trois ouvrages les débits d'exploitation ne dépassent pas les 2,5m³/h (SR1, SR2, SR3). A l'inverse, les 3 autres forages (SR4, SR5, F1, F2) ont des débits supérieurs à 5m³/h. L'eau provient de fractures uniques dont la présence a pu être confirmée par les cuttings de foration l'augmentation soudaine des débits à au soufflage, le log de conductivité/température et l'inspection par caméra de forage.
- Les panneaux électriques ont permis de repérer la présence de singularités tectoniques et/ou filoniennes. Nous pensons que ces ouvrages relativement productifs sont en connexion avec ces accidents tectoniques situés à proximité immédiate, qui sont probablement des mouvements tectoniques récents ([3]).

L'ensemble de ces données permet de poser les bases d'une réflexion visant à adapter et améliorer les méthodologies de prospection hydrogéologique existantes dans le socle fissuré en Guyane.

Références bibliographiques :

[1] Rampnoux N, Lachassagne P, Laporte P, Besse A, 1996 – Alimentation en eau potable du bourg de Grand Santi, recherche d'eau souterraine, Rapport BRGM/R 39012, 22p, 10 fig., 3 ann.

[2] Courbin A, Gandolfi JM, B. Joseph, M. Nicolé, M. Parizot, Wyns R. - 2014. Prospection hydrogéologique du socle fracturé à Grand Santi - Campagne émanométrique radon et géophysique. Rapport BRGM/RP-63396-FR. 143 p., 48 ill., 08 ann.

[3] Palvadeau E., Géodynamique quaternaire de la Guyane française, 1999 – Doc BRGM 287, 232p

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

JM. Baltassat⁽¹⁾, F. Mathieu⁽¹⁾, B. Ambroise⁽²⁾, C. Barbet⁽³⁾, O. Béon⁽⁴⁾, B. Dewandel⁽⁵⁾, P. Lachassagne⁽³⁾, J-C Maréchal⁽⁵⁾, A. Norie⁽⁴⁾, R. Wyns⁽⁶⁾

(1) BRGM, DRP/RAI, BP 36009, 45060 Orléans Cedex2

(2) Université de Strasbourg, 67000 Strasbourg

(3) Danone Waters, Evian-Volvic-World, BP 87, 74500 Evian-les-Bains Cedex

(4) Danone Waters, Water Division, BP 87, 74500 Evian-les-Bains Cedex

(5) BRGM, D3E/NRE, Montpellier, France

(6) BRGM, DGR/GAT, BP 36009, 45060 Orléans Cedex2

Le BRGM réalise et supervise des explorations géophysiques des ressources en eau, en domaine de socle et participe à des projets de recherche visant la caractérisation de ces milieux sur des terrains de jeu variés à travers le monde. Depuis les années 1990, les méthodes classiques du traîné et du sondage électrique ont été remplacées par la tomographie électrique pour une résolution optimisée des variations latérales de résistivités qui rendent mieux compte des géométries discontinues des aquifères de socle. L'application des tomographies électriques utilise des équipements et des configurations de mesure, des procédés de traitement et d'inversion des données spécifiquement adaptés à ces environnements particuliers.

Ces procédures de travail, leurs pré-requis, leurs limites et les résultats obtenus sont illustrés par des exemples d'application sur différents sites bien documentés par des données de forage et diagraphie dans différents environnements granitique, de cornéennes et de méta-sédiment en France, en Inde, en Guyane, en Uruguay et en Chine.

Une fois les données acquises, analysées, qualifiées, traitées et inversées au moyen de méthodes adaptées, les résultats de la tomographie électrique de résistivité sont globalement la définition d'une succession résistant-conducteur-résistant rendant compte du profil d'altération stratiforme et des couches aquifères associés, tels que définies par R. Wyns et al. 2004, ainsi que l'épaississement localisé, voire l'enracinement de la couche conductrice intercalée, traduisant généralement la présence de discontinuités subverticales (fractures, , filons, contacts lithologiques...) . Les performances et les limites de la méthode pour distinguer, dans la couche conductrice intercalée, plusieurs niveaux imageant les parties capacitive et transmissive de l'aquifère ou le passage zone non saturée à zone saturée sont discutées.

Sur la base de ces résultats, une procédure générale d'exploration se dessine ciblant pour les forages hydrogéologiques d'exploration d'une part les profils d'altération les plus épais pour une épaisseur maximale de l'aquifère et de la zone fissurée productive, à sa base et d'autre part les discontinuités subverticales pour bénéficier de la productivité des failles, filons et contacts ; ces dernières constituant des cibles de forage de choix, notamment lorsque l'horizon fissuré du profil d'altération stratiforme est réduit. Parallèlement, les zones les plus conductrices sont identifiées et déconseillées afin d'éviter les formations argilisées peu perméables.

Wyns R., Baltassat J.M. , Lachassagne P., Legtchenko A., Vairon J. (2004).- Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). Bull. Soc. Géol. Fr., 175(1), 21-34.

Prospections géophysiques adaptées au socle

Viviane Borne - Christopher Boulay

Calligée

v.borne@calligee.fr - c.boulay@calligee.fr

Depuis longtemps maintenant (années 80) ; mais surtout dans l'Ouest de la France, la prospection géophysique la plus utilisée pour la recherche en eau souterraine dans le socle, est la méthode VLF. C'est une méthode qui vient de la prospection minière au Canada, mise en œuvre pour la recherche en eau dans le socle pour la première fois en Vendée par la DDAF.

Au départ, on ne réalisait que des cartes de résistivités apparentes ; mais toujours avec deux émetteurs perpendiculaires, puisque cette méthode est directionnelle. Petit à petit, on a développé des interprétations « en modèle bicouche », afin de différencier les zones d'altération argileuses, des fractures profondes et des interprétations des données magnétiques en phase, conduisant à la réalisation de pseudo-sections qui donnent le sens de pendage des failles.

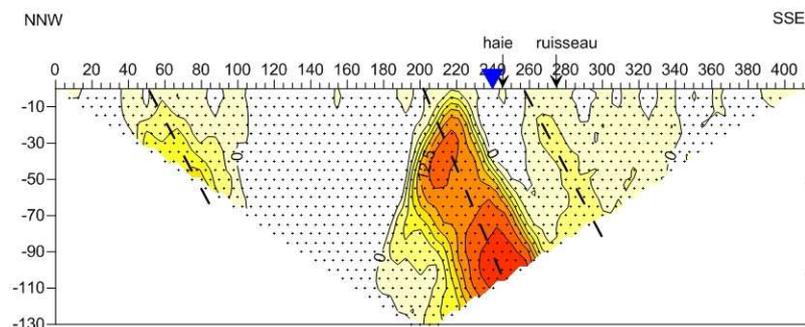


Figure 1 - Représentation d'une pseudo-section magnétique et implantation du forage afin de recouper la faille en profondeur

La tomographie électrique est également utilisée pour la recherche en eau dans le socle ; mais il convient d'adapter le protocole de mesure à ce que l'on cherche, sachant que la profondeur d'investigation pour les dispositifs « classiques » (320 m) ne dépasse pas une quarantaine de mètres, et que les terrains sont généralement anisotropes en domaine de socle. Actuellement, les forages pour l'eau potable sont menés jusqu'à 150-200 m, les méthodes géophysiques citées plus haut ne sont plus adaptées. Il faut donc mettre en œuvre d'autres protocoles ou matériels, comme la tomographie électrique grande longueur, la RMP, le TDEM, les méthodes électromagnétiques multifréquences ; mais ce sont des méthodes intégrantes, il reste l'audio-magnéto-tellurique qui a donné de bons résultats dans les contextes recherchés (fracturation sous couverture).

Références bibliographiques :

- [1] Grisseman Ch., Reitmayr G., 1978 - VLF magnetotellurics in ore exploration and structural geology. *48th. SEG meeting in San Francisco*
- [2] Geonics Limited, 1979 - EM 16R Operating manual. *Technical note. Canada*, 34 p
- [3] Borne V., Chevalier M., 1989 - Détection de fractures et de bassins d'effondrement par méthode électromagnétique. *Annales de la Société géologique de Belgique*, t. 112 (fasc.2), pp 421-430

Caractérisation hydrogéophysique des aquifères de socle pour l'amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise du bassin versant du Bandama blanc amont (Côte d'Ivoire)

Ouedraogo M.^{1,2}, Pessel M.¹, Durand V.¹, Marlin C.¹, Savane I.²

¹ UMR 8148 GEOPS, Univ. Paris-Sud ; CNRS ; 91405 Orsay Cedex, France

² Laboratoire de Géosciences et Environnement (LGE), Université NANGUI ABROGOUA,
02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire
E-mail : moussa.ouedraogo@u-psud.fr

Le bassin versant du Bandama blanc amont, au nord de la Côte d'Ivoire, est situé sur un aquifère de socle fissuré, composé de granites et de schistes. Cet aquifère est mal connu, tant dans la géométrie des réservoirs que dans le potentiel hydrogéologique des réserves qu'il contient. Et la précarité des populations rurales est en partie liée au nombre encore insuffisant des points d'approvisionnement en eau potable. Un nombre important d'échecs a été observé lors de la réalisation des ouvrages de captages des eaux souterraines, dont l'une des causes est l'hétérogénéité locale et parfois régionale importante du sous-sol.

Cette étude consiste à améliorer les connaissances sur le fonctionnement hydrodynamique des réservoirs du socle fissuré (géométrie des aquifères, paramètres hydrodynamiques) en vue de l'installation future d'ouvrages de captage.

L'objectif est ici de coupler des mesures électromagnétiques et de résonance magnétique protonique à des données d'hydrogéologie (suivis piézométriques et essais par pompages) pour affiner la géométrie et le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère et mieux contraindre l'exploitation des sites, notamment en terme de stabilité des débits prélevés.

Une connaissance fine de la géométrie locale des aquifères associées à des champs captants est probablement une piste importante pour améliorer la régularité de la production d'eau.

Caractérisation hydrogéologique des entités BDLISA délimitées en zone de socle et transposition de l'information sur la carte hydrogéologique de la France

D.Allier⁽¹⁾, B. Mougin⁽¹⁾, J.J. Seguin⁽¹⁾
⁽¹⁾BRGM

d.allier@brgm.fr; b.mougin@brgm.fr; jj.seguin@brgm.fr

Le Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA (actuellement en version 1) a été construit sur la base d'une méthodologie nationale précisant les règles à appliquer pour la délimitation et la caractérisation des entités hydrogéologiques au sein de chacun des 5 grands ensembles géologiques identifiés sur le territoire national et dans les départements et régions d'outre-mer (Sédimentaire, Alluvial, Volcanisme, Intensément plissé de montagne et Socle).

On présente ici la méthodologie de délimitation et de caractérisation, en termes de perméabilité, des entités de socle dans les régions Pays-de-la-Loire et Bretagne [2]. Ces entités correspondent à des bassins versants, la logique de sélection et d'assemblage des bassins étant précisée dans le guide national.

Une fois les bassins versants définis, plusieurs étapes ont été nécessaires pour leur attribuer un degré de perméabilité : perméable, semi-perméable, imperméable. Ces étapes, sont les suivantes :

- 1) Sélection et assemblage des différentes formations de socle dans les cartes géologiques harmonisées (l'échelle de travail est le 1/50 000).
- 2) Analyse des données collectées sur plusieurs milliers de forages (débit instantané en fin de foration rapporté à la profondeur du forage) pour déterminer les potentialités aquifères des formations géologiques (l'échelle de travail est ici le 1/250 000). IL en résulte n_{eg} entités géologiques dotées d'une perméabilité.
- 3) Etablissement des correspondances entre la carte géologique au 1/250 000 et les cartes géologiques harmonisées au 1/50 000.
- 4) Intersection des bassins versants et des n_{eg} entités géologiques caractérisées par un degré de perméabilité, puis affectation aux formations géologiques des degrés de perméabilité.

Un deuxième problème abordé ici est celui du changement d'échelle : comment passer d'une cartographie à 1/50 000 des entités de socle à une cartographie à 1/1 000 000 en préservant au mieux la caractérisation faite à l'étape 4 mentionnée ci-dessus, problème qui s'est posé lors de la construction de la nouvelle carte hydrogéologique de la France à l'échelle du millionième [1].

Références bibliographiques :

[1] Allier D., Berli J., Pinson S., Seguin J.J. (2015). Carte hydrogéologique de la France à l'échelle du millionième.

[2] Baudouin V., Chrétien P., Mougin B., Rouxel E. (2010). Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Bassin Loire-Bretagne. Années 3 et 4. Délimitation des entités hydrogéologiques en Bretagne (année 4) et en Pays-de-la-Loire dans les départements de Vendée, Loire-Atlantique et Mayenne (année 3). Rapport d'étape. BRGM/RP-5-62227-FR.

SESSION 2

**METHODES D'IMPLANTATION DES FORAGES ET DE CARTOGRAPHIE DES
POTENTIALITES EN EAU SOUTERRAINE EN CONTEXTE DE SOCLE – DE L'ECHELLE
REGIONALE A L'ECHELLE LOCALE**

**METHODS FOR WATER WELL SITING AND FOR MAPPING HRA POTENTIALITIES:
FROM THE REGIONAL TO THE WELL SCALE**

POSTERS

P2-1

Caractérisation des aquifères de socle par la résistivité électrique. Pratique de l'implantation de forages et perspectives d'amélioration au Bénin.

Allé, C.^(1,2); Descloitres, M.⁽²⁾; Vouillamoz, J.M.⁽²⁾; Yalo, N.⁽¹⁾; Lawson, M.^(1,2); Adihou, C.⁽¹⁾

(1) Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, équipe JEAI AQUI-BÉNIN, Univ. d'Abomey Calavi, Bénin, christianland02@yahoo.fr; nicaise.yalo@ird.fr; lawson.amen@yahoo.fr; aaconsolas@gmail.com

(2) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, marc.descloitres@ird.fr; jean-michel.vouillamoz@ird.fr

Les statistiques montrent qu'environ 40% des forages réalisés dans le socle du Bénin sont négatifs malgré une implantation par des mesures géophysiques 1D (trainés et sondages électriques) guidée par photo-interprétation préalable [1]. Notre étude a pour objectif d'évaluer les raisons possibles de ce fort taux d'échec et si l'utilisation de tomographie de résistivité électrique en 2D [2] permettra de le réduire.

Dans un premier temps, à l'aide de modélisations synthétiques basées sur des géométries et résistivités adaptées au cas du Bénin, la détectabilité de différentes structures par les trainés électriques est évaluée. Quelques modèles équivalents en trainés sont ensuite étudiés en sondage électrique, tout en dégageant leurs sévères limites. Enfin, les avantages et les limites de la tomographie de résistivité électrique 2D sont dégagés, plaidant pour leur utilisation généralisée. Notre étude montre l'intérêt d'augmenter la pénétration dans le socle par des mesures Pole-Dipôle dans le cas où l'épaisseur d'altération est importante. Des interprétations géologiques sont construites à partir des images électriques 2D sur les sites expérimentaux du projet GRIBA. La comparaison avec la lithologie des forages montre une bonne description des géométries de la zone altérée (ZA) et de la zone fissurée-altérée (ZFA). Nos modélisations synthétiques et nos résultats de terrain montrent que la résolution des mesures géophysiques 2D ne permet pas d'identifier si un forage recoupe - ou non - un réseau productif de fissures/fractures au sein de la zone fissurée (ou dans le socle). En conséquence, l'imagerie 2D restera insuffisante pour améliorer à 100% le succès des implantations de forages.

Références bibliographiques :

- [1] Vouillamoz, J.M., Tossa, A.Y.A., Chatenoux, B., Kpegli, K.A.R., (2015). Propriétés des aquifères de socle du Bénin: analyse multi-variables et multi-échelles des paramètres de contrôle. « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015.
- [2] Descloitres, M., Ruiz, L., Sekhar, M., Legchenko, A., Braun, J.J., Kumar, M.S.M., Subramanian, S., 2008. Characterization of seasonal local recharge using electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding, *Hydrological Processes*. 22, 384–394.

P2-2

Contribution of seismic methods to hydrogeophysics: recent advances within CRITEX

Sylvain Pasquet⁽¹⁾, Ludovic Bodet⁽¹⁾ and Roger Guérin⁽¹⁾

(1) Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7619 METIS

sylvain.pasquet@upmc.fr

The basic characterization of aquifer systems mainly relies on piezometric and log data, e.g. on local information. Delineating spatial variations of the lithology between piezometers is a delicate task, which inevitably generates errors possibly propagating into hydrological models. In this case, only geophysical imaging methods provide appropriate tools to interpolate boreholes data and estimate heterogeneities in the geological model. Time Domain Electromagnetic Methods (TDEM), Electrical soundings (ES) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) are for instance performed to assess the regional geological structure and the local connectivity between the stream network and the different aquifer units. If electrical and electromagnetic methods show their efficiency for the multi-scale characterization of the lithology, they remain unable to detect the water table level in clayey formations. In the framework of the French national project CRITEX, we recently proposed, along with ERT, the combined use of pressure- and surface-wave seismic methods to simultaneously estimate pressure- and shear-wave seismic velocities (V_p and V_s , respectively, which are highly decoupled in the presence of fluids).

This methodology for instance enabled the estimation of 1D V_p/V_s (or Poisson's) ratios in the shallow layers of the aquifer system studied in the Orgeval Critical Zone Observatory. We were able to detect the water table level under different hydrological conditions on a laterally continuous multi-layered aquifer system. This methodology was also validated in the context of a fractured aquifer presenting strong discontinuities (with a contact between granites and micaschists) in the Ploemeur hydrological observatory (south of Brittany, France). A 450-m long seismic line made it possible to retrieve a 2D pseudo-section of V_p/V_s ratio, which clearly highlighted lateral variations of lithology. Again, several local contrasts observed on the V_p/V_s images were related to variations of superficial water content. Timelapse data are currently being processed to monitor the seasonal variations of V_p/V_s ratio along the profile, in order to definitely confirm seismic methods as key hydrogeophysical tools.

P2-3

Approche interprétative des données de prospection hydrogéologique et géophysique pour le choix des meilleurs sites de forages en milieu de socle cristallin et métamorphique en Côte d'Ivoire

Konan Emmanuel Kouadio ⁽¹⁾ - Arthur Brice Konan-Waidhet ⁽²⁾

⁽¹⁾ UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire ; Email : emmakouadio@hotmail.com

⁽²⁾ UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire ; Email : konanwab@yahoo.fr

La recherche des eaux souterraines en milieu de socle cristallin et métamorphique nécessite à la fois une étude hydrogéologique couplée avec une investigation géophysique pour mieux appréhender les points favorables à l'implantation des forages. Cependant, comme les résistivités électriques mesurées ne signifient pas absolument la présence de l'eau, l'interprétation conduisant au choix des meilleurs sites parmi les sites identifiés pose souvent problème et on assiste à des échecs lors de la réalisation des forages.

Dans le cadre du programme d'hydraulique urbaine KfW VI, une étude type a été menée dans le but de mettre en évidence l'intérêt de la compilation des informations purement hydrogéologiques et des données d'investigations géophysiques afin de parvenir au meilleur choix des sites de forages.

Pour ce faire, trois sites sont étudiés dans chaque localité en considérant deux critères : paramètres hydrogéologiques et paramètres géophysiques. Une analyse est faite pour chaque critère sur chaque site et une note est attribuée sous forme d'étoiles. Le nombre d'étoiles varie de 1 à 3 selon la qualité des paramètres étudiés. On procède ensuite à une classification des sites en additionnant les étoiles obtenues par chaque paramètre évalué. Le site ayant obtenu le plus grand nombre d'étoiles est admis comme meilleur. De la même manière on détermine le site classé deuxième ou troisième. Enfin, la classification ainsi faite détermine l'ordre de foration pour la campagne de forages.

Sur la base de cette classification, la campagne a eu lieu et les résultats sont probants. Le taux de succès est de 75% sur la base du débit minimum admissible de 5 m³/h. La plupart du temps, les sites classés prioritaires ont donné satisfaction, soit 93% de réussite. Cependant, dans certains cas, les sites classés en deuxième ou troisième ordre ont produit de meilleurs débits que les sites classés en premier ordre.

En gros la méthode donne satisfaction mais ne permet pas de quantifier les réserves d'eau de la nappe.

P2-4

Investigations mises en œuvre pour la mise en exploitation d'un aquifère de socle à la Guitonnière - Beaufou (85)

Aurélie Ricaud - Viviane Borne

Calligée

a.ricaud@calligee.fr - v.borne@calligee.fr

L'intérêt de cette étude est qu'elle a pu être menée jusqu'au bout, depuis l'analyse des photographies aériennes en 2003 jusqu'aux études d'impact imposées par la nouvelle réglementation. Douze années après les premières investigations, le forage n'est toujours pas en service compte tenu de la lourdeur des diverses démarches réglementaires à effectuer.

Le contexte géologique est favorable, le site est au contact entre des micaschistes à filons de phanites et des granites à deux micas, avec des limons de plateaux sur les reliefs et un linéament bien marqué de direction N 60°.

Le forage a été implanté en bordure d'un axe conducteur N 30° et au croisement d'anomalies magnétiques, il a été foré jusqu'à 124 m. Sous 15 m d'altérites, le granite fracturé a été trouvé à partir de 29 m où une première arrivée d'eau a été mesurée à 12 m³/h. A la fin du forage, le débit mesuré au soufflage était de 76 m³/h. Après équipement et isolation des altérites, le forage présentait un léger débit d'artésianisme.

Le forage recoupe deux horizons aquifères distincts : une nappe superficielle contenue dans les altérites isolée par cimentation et une « nappe » profonde semi-captive contenue dans le socle granitique fissuré et fracturé alimentée par les précipitations efficaces infiltrées et drainées sous les altérites par les fractures profondes. Les derniers essais de pompage fournissent un débit critique à 54 m³/h, et démontrent une absence de relation entre le forage et le ruisseau de la Grève situé à 300 m.

La qualité de l'eau est bonne, seul le traitement du fer et du manganèse est nécessaire.

Les différentes études menées sur le bassin versant topographique (pédologie, occupation des sols, enquêtes environnementales et agronomiques), ont montré que ce site est peu vulnérable et que les risques de pollution des eaux sont modérés.

Pour une recharge annuelle évaluée à 180 000 m³, l'aire minimale nécessaire pour assurer la production du captage envisagée a été estimée à 2 km². Comme une incertitude subsistait, notamment vers le Sud, pour sa délimitation sur le terrain et la définition des périmètres de protection, des études complémentaires ont été menées : une campagne géophysique destinée à implanter des piézomètres au niveau des principaux linéaments repérés par photographie aérienne autour du site, et des essais de pompage de deux mois avec le suivi de 27 points d'eau.

Les conclusions qui en découlent confirment que :

- la présence de deux niveaux de nappe est confirmée (altérites et aquifère fracturé) ;
- la nappe des altérites est perchée au-dessus de l'aquifère fracturé ;
- la nappe superficielle est drainée par le ruisseau de la Grève ;

le forage draine la partie amont du bassin versant topographique, par l'intermédiaire d'un seul couloir de fracturation.

SESSION 3

FONCTIONNEMENT, GESTION ET MODELISATION DES AQUIFERES DE SOCLE

**FUNCTIONING OF HRA.WATER RESSOURCE MANAGEMENT
AND MODELING OF HRA**

***COMMUNICATIONS ORALES
ORAL COMMUNICATIONS***

Impact du compartiment fracturé sur le temps de réponse des bassins-versants : apports de la datation des eaux

L. Aquilina⁽¹⁾, V. Vergnaud-Ayraud⁽¹⁾, T. Labasque⁽¹⁾, G. Pinay⁽¹⁾, J.R. de Dreuzy⁽¹⁾, T. Kolbe⁽¹⁾, B. Abbot⁽¹⁾, Z. Thomas⁽²⁾, L. Ruiz⁽²⁾, C. Vautier⁽¹⁾

(1) Observatoire de Rennes, Université Rennes1-CNRS

(2) UMR S.A.S. Agrocampus Ouest – INRA

Luc.aquilina@univ-rennes1.fr; virginie.vergnaud@univ-rennes1.fr

Les milieux fracturés sont caractérisés par une forte compartimentation déjà bien documentée. Si la partie altérée proche de la surface est la partie la plus exploitée, la partie fracturée plus profonde est moins bien connue. En particulier, son rôle dans les écoulements de surface reste méconnu. En conséquence, le temps de réponse des bassins versants en milieu fracturé ne peut être décrit simplement par un temps moyen, la compartimentation générant une distribution des temps de résidence. D'un bassin à l'autre, pour un temps de résidence moyen équivalent, une distribution différente va pourtant engendrer des dynamiques assez différentes. Ce point est particulièrement important pour analyser l'impact de mesures visant à faire évoluer les pratiques de surface (mesure agri-environnementales ou mise en place d'un périmètre de captage par exemple). L'analyse des gaz dissous et les mesures de « datation » des eaux qui en découlent permettent de mieux appréhender la dynamique globale des réponses des bassins versants et en particulier le rôle des compartiments profonds.

Une première étude porte sur le site d'observation de Pleine-Fougères (35) où la distribution des temps de résidence permet de contraindre un modèle d'écoulement à l'échelle d'une dizaine de kilomètres. On observe à la fois des cellules de circulation locales emboîtées dans un système d'écoulement plus profond avec des temps de résidence dépassant l'époque d'intensification de l'agriculture. La contribution de ce compartiment profond à la rivière et de l'ordre de 30% des écoulements.

A l'échelle régionale, une analyse des temps de résidence en fonction de la profondeur permet de montrer un schéma d'écoulement global à l'échelle régionale avec des vitesses de l'ordre du mètre par an. Une telle étude permet également de reconstituer l'historique des concentrations en nitrates dans la recharge et de contraindre les temps de transfert. Une analyse à l'échelle du bassin versant de la Vilaine permet là encore de montrer que la contribution du compartiment profond est de l'ordre de 30%, au moins durant la saison hivernale.

L'analyse des temps de résidence montre également que la mise en place d'un prélèvement génère à la fois une diminution des temps moyen de résidence par l'introduction d'eaux de surface et/ou une augmentation de ces temps du fait de la remontée de boucles de circulation plus profondes.

Large-scale structural controls on hydrogeological properties and groundwater modelling in the Upper Oueme basement basin (Benin, West Africa)

Neil Dickson⁽¹⁾, Jean-Christophe Comte^(1,2), Jean-Michel Vouillamoz⁽³⁾, Youssouf Koussoube⁽⁴⁾, Ulrich Ofterdinger⁽¹⁾

⁽¹⁾ Queen's University Belfast, School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Northern Ireland (UK), ⁽²⁾ University of Aberdeen, School of Geosciences, Scotland (UK), ⁽³⁾ Institut de Recherche pour le Développement, Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (France), ⁽⁴⁾ Université de Ouagadougou (Burkina Faso)

ndickson03@gub.ac.uk; jc.comte@abdn.ac.uk; jean-michel.vouillamoz@ird.fr;
youssouf.koussoube@gmail.com; u.ofterdinger@gub.ac.uk

Basin scale groundwater modelling is challenging in basement rocks due to the high spatial variability of aquifer hydrogeological properties typically controlled by weathering, fracturing and lithological diversity. The metamorphic basement units of the Upper Ouémé watershed (14,500 km²) in Benin have been investigated to identify the structural controls on aquifer hydraulic properties, groundwater flow and water balance at large scale. Spatial analysis of borehole, remote sensing and hydrogeophysical data suggest poor correlation between bedrock lithological types, lineaments, and geomorphological features with weathering profiles and hydraulic properties. Instead, large scale weathered zone geometry, aquifer transmissivity and storage properties appear better correlated to a palaeo-weathering surface identified through mapping of the residual lateritic iron crust surface. Based on a number of alternative aquifer conceptual models developed, nine transient numerical groundwater models were applied.

Assessment of models against observations, including groundwater heads, river flow rate and catchment water balance, suggest that the best conceptual models are those where hydraulic properties are distributed according to (i) the geometry of the weathered zone based on the interpolation of borehole and geophysical data and (ii) the lineaments density within both weathered and fresh basement. Modelled groundwater balance suggests that the combined borehole abstraction in the basin is less than 10% of the average groundwater discharge to surface drainage network (~90 m³/s) and that about 90% of this localized discharge is lost to evapotranspiration, leaving the remaining 10% to contribute to streamflow.

Prédiction des temps de renouvellement dans les aquifères de socle à partir des données de datation des eaux

**Jean-Raynald de Dreuzy⁽¹⁾, Jean Marçais⁽¹⁾, Pauline Gueutin⁽²⁾, Sarah Leray⁽³⁾,
Olivier Bour⁽¹⁾, Luc Aquilina⁽¹⁾, Virginie Vergnaud-Ayraud⁽¹⁾**

(1) Observatoire de Rennes, Université Rennes 1, France, (2) Ecole des hautes études en santé publique, Rennes, France, (3) IFP Énergies nouvelles, Rueil-Malmaison, France

Jean-Raynald.de-Dreuzy@univ-rennes1.fr

Les distributions des temps de transit jouent un rôle central dans les processus de transport, dans l'interprétation des traceurs anthropogéniques ainsi que dans les prédictions portant sur les ressources en eau souterraine dans les aquifères de socle. Cependant elles ne sont pas accessibles directement à l'aide de mesures de terrain. Seules certains moments peuvent être déduites à partir des concentrations en traceurs anthropogéniques, souvent appelées données d'âges de l'eau. Nous évaluons les capacités prédictives de l'information contenue dans les concentrations des traceurs anthropogéniques sur les temps de renouvellement dans les aquifères grâce à l'utilisation de modèles approchés de distributions paramétriques.

Pour cela, nous développons une méthodologie reposant sur un aquifère synthétique représentant l'aquifère de socle de Ploemeur (Bretagne, France) utilisé pour fournir en tout point de l'aquifère, des références pour les quantités observables (concentrations anthropogéniques des traceurs CFC-11, 85Kr et SF6), des références pour des quantités «non-observables» (la distribution des temps de transit) et des références en terme de prédiction (temps de renouvellement dans l'aquifère). Les prédictions réalisées à partir de plusieurs modèles approchés (Lumped Parameters Models) à un, deux ou trois paramètres sont comparées en tout point aux résultats synthétiques en fonction de la quantité de données utilisées.

L'utilisation d'un seul traceur donne de mauvaises prédictions différant de 7 à 12 ans des prédictions de référence. L'utilisation de deux traceurs anthropogénique suffisamment différent ne réduit pas seulement les erreurs mais conduit à des prédictions précises avec une erreur de l'ordre de 3 ans. L'utilisation d'un troisième traceur anthropogénique n'améliore pas le pouvoir prédictif de ces modèles. Une analyse a posteriori révèle que les distributions de temps de transit de référence varient considérablement de distributions bien piquées dans les zones de recharge à des distributions plus larges dans les zones de convergence. Néanmoins, le même Lumped Parameters Model que ce soit une inverse gaussienne ou une exponentielle shiftée donne des prédictions excellentes quelque soit la position dans l'aquifère. Dans les schémas de circulation où les procédés de mélange et de convergence prévalent, les distributions larges semblent plus adaptées que les modèles multimodaux ou les modèles «shape-free».

Investigations hydrochimiques et hydrodynamiques pour préciser les modalités d'écoulements dans les aquifères de socle. Application au massif de l'Ursuya (France, 64)

J. Jaunat⁽¹⁾, F. Huneau⁽²⁾, A. Dupuy⁽³⁾, H. Celle-Jeanton⁽⁴⁾, P. Le Coustumer⁽³⁾

⁽¹⁾ Université de Reims Champagne-Ardenne, EA 3795 – GEGENAA

⁽²⁾ Université de Corse, UMR CNRS 6134 SPE, Laboratoire d'hydrogéologie

⁽³⁾ Université de Bordeaux, ENSEIGID - IPB, EA 4592 Géoressources & Environnement,

⁽⁴⁾ Clermont Université, UMR 6524 CNRS IRD, Laboratoire Magmas et Volcans

Jessy.jaunat@univ-reims.fr

Les aquifères fracturés constituent un enjeu majeur de l'hydrogéologie actuelle. Le massif de l'Ursuya (France, 64) en est une illustration. Constitué de formations métamorphiques fracturées, il est intensément exploité pour l'alimentation en eau potable du nord du Pays Basque. Une approche multidisciplinaire a permis d'accéder à la compréhension du fonctionnement de ce système.

Le signal d'entrée est caractérisé dans sa composante quantitative et qualitative. Le suivi des paramètres climatiques permet d'estimer la lame d'eau participant à la recharge de l'aquifère. Les concentrations en ions majeurs de l'eau de pluie sont ensuite analysées au regard des paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine. Des processus de minéralisation spécifiques sont ainsi mis en évidence, en fonction des milieux de circulation (matériaux plus ou moins altérés) et des interactions eau-roche associés. La géochimie des eaux souterraines est ensuite étudiée conjointement avec des données sur les temps de séjour obtenues par l'interprétation des teneurs en ³H, CFCs et SF₆. Les caractéristiques physico-chimiques, les temps de résidences mesurés (moins de 10 ans à plus de 50 ans) et les phénomènes de mélanges associés permettent de proposer un modèle conceptuel des écoulements souterrains à l'échelle du massif. Celui-ci met en exergue le rôle prépondérant du profil d'altération développé dans les milieux cristallins (altérites, roche fissurée et roche saine), du point de vue de la minéralisation de l'eau comme de celui des modalités d'écoulements et de leur dynamique. Une approche quantitative est finalement proposée. Du point de vue hydrodynamique, l'hétérogénéité spatiale est importante ($10^{-4} \text{ m s}^{-1} < K < 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$). Un modèle numérique synthétise et valide l'ensemble de ces résultats. Les simulations montrent de fortes interactions entre les réseaux d'écoulements superficiels et souterrains et le faible impact de l'exploitation actuelle sur les volumes disponibles. Les évolutions climatiques testées ne modifieront pas significativement les écoulements durant les prochaines décennies, malgré une probable légère diminution des débits des sources et des cours d'eau.

Ces résultats constituent une avancée dans la connaissance des aquifères discontinus et offrent des pistes pour une gestion raisonnée de ce type de ressource. La méthodologie adoptée au cours de cette étude se veut transposable à tout aquifère de socle dans un contexte d'altération similaire.

Piézométrie d'une zone de socle sous climat soudano-guinéen (Ouémé supérieur, Bénin). Modélisation pluriannuelle et tentative de reconstitution historique depuis 1950

**Campoy A.⁽¹⁾, Séguis L.⁽¹⁾, Boukari M.⁽²⁾, Akokponhoue N.⁽²⁾,
Descloîtres M.⁽³⁾ et Vouillamoz J.-M.⁽³⁾**

- (1) IRD-HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier, France
(2) Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, Université Abomey Calavi, Cotonou, Bénin
(3) IRD-LTHE, Direction générale de l'Eau, Cotonou, Bénin

luc.seguis@ird.fr

L'Afrique de l'Ouest est sujette à une importante variabilité climatique, bien documentée depuis 1950 par les réseaux nationaux de suivis long terme des précipitations et des écoulements de surface. En Afrique de l'Ouest humide, on a constaté dans les années 1980-2000 une baisse des précipitations de l'ordre de 20% conjuguée à un effondrement des écoulements de l'ordre de 50%. Malheureusement, l'information historique sur les fluctuations piézométriques en zones de socle, majoritaires en Afrique de l'Ouest humide, est extrêmement réduite. Sur l'observatoire hydrologique long terme de la haute vallée de l'Ouémé Supérieur (Bénin), une compilation des données piézométriques anciennes (niveau statique lors de l'installation des forages et des puits de large diamètre) est réalisée. L'importance des lacunes rend difficile une reconstitution historique. Pour pallier ce déficit d'information, des chroniques piézométriques collectées depuis 2003 dans le cadre de l'observatoire Amma-Catch de la Haute Vallée de l'Ouémé [1] servent à la mise au point d'un modèle dérivé du modèle de bilan COMFORT [2] simulant le signal piézométrique à partir des précipitations, de l'évapotranspiration potentielle, de la dynamique de la végétation et de la porosité de drainage dérivée de sondage par résonance des protons.

Le modèle appliqué aux chroniques de précipitation depuis 1950 permet de tenter une reconstitution historique de la piézométrie délicate à valider du fait de l'importance des lacunes. Ceci plaide plus que jamais pour l'importance de suivis piézométriques long terme en Afrique de l'Ouest. Associés aux nouvelles techniques géophysiques, on peut espérer une meilleure modélisation hydrogéologique (Lawson et al, [3]).

Références bibliographiques :

- [1] Séguis, L., Kamagaté, B., Favreau, G., Descloîtres, M., Seidel, J.-L., Galle, S., Peugeot, C., Gosset, M., Le Barbé, L., Malinur, F., Van Exter, S., Arjounin, M., Boubkraoui, S., et Wubda, M., 2011 - Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: The Donga basin (Benin, West Africa). *Journal of Hydrology*, 402, 1-13.
- [2] Ruiz, L., Varma, M. R. R., Kumar, M. S. M., Sekhar, M., Maréchal, J.-C., Descloîtres, M., Riotte, J., Kumar, S., Kumar, C., et Braun, J.-J., 2010. Water balance modelling in a tropical watershed under deciduous forest (Mule Hole, India): Regolith matrix storage buffers the groundwater recharge process. *Journal of Hydrology*, 380(3-4), 460-472.
- [3] Lawson, F.M.A., Vouillamoz, J.-M., Yalo, N. et Descloîtres, M. Application de la Résonance Magnétique Protonique à la caractérisation des aquifères de socle: exemple du Bénin. 2015. 20èmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie, La Chapelle-Hermier, France

The two-layer conceptual model of hard-rock aquifers: validation with a deterministic hydrogeological model

Durand V.⁽¹⁾, Léonardi V.⁽²⁾, de Marsily G.⁽³⁾, Lachassagne P.⁽⁴⁾

(1) UMR 8148 GEOPS, Univ. Paris Sud, 91405 Orsay Cedex; CNRS; veronique.durand@u-psud.fr

(2) Hydrosiences Montpellier, UMR 5569, Univ. de Montpellier; veronique.leonardi@um2.fr

(3) UMR 7619 Metis, Sorbonne Université, UPMC Université Paris 06, 75005 Paris; CNRS; gdemarsily@aol.com

(4) Danone Waters, Evian-Volvic-World, BP 87, 74500 Evian-les-Bains Cedex; patrick.lachassagne@danone.com

Hard-rock aquifers have long been considered as two-layer systems, with a mostly capacitive layer just below the surface, the weathered layer, and a mostly transmissive layer underneath, the fissured layer. Although this hydrogeological conceptual model now gathers a large consensus in the scientific community, it is difficult to prove that it can be efficient in terms of deterministic modeling, especially with an equivalent porous medium model, which would not be the first choice for "fractured aquifers". Consequently, the objectives of this presentation are to present a new methodology developed for the calibration of such a two-layer finite-difference hydrogeological model and to show that it enables to identify and efficiently calibrate, in transient state, the hydrodynamic parameters of each of the two layers.

The application site is the Plancoët migmatitic aquifer located in north-west Brittany, France, with, among others, piezometric data from 25 piezometers surveyed every two weeks during eight years. The main difficulty for the calibration process is to manage the interdependence between the aquifer hydrodynamic parameters on the one hand, and the flow through the aquifer, i.e. the recharge here, on the other hand. In order to overcome this problem, a large number of parameter sets have been tested, using an exhaustive combination of hydraulic conductivity, specific yield and recharge, each within a defined range of realistic values. This long manual calibration process has been compared with an automatic calibration method, using the head deviation variance as a quality-of-fit criterion. It has been shown that this most common quality-of-fit criterion is inefficient for calibrating the specific yield and the recharge. To better fit the recharge and the specific yield, a new quality-of-fit criterion, "advar", has been developed, based on the seasonal piezometric amplitude variation. It enabled to define the best values for all the interdependent parameters and to conclude that this two-layer model is well suited for such a hard rock aquifer.

Multidisciplinary investigations of poorly productive hard rock aquifers in Ireland: typologies, properties and significance in the Irish water cycle

Ulrich Ofterdinger⁽¹⁾, Jean-Christophe Comte⁽²⁾, Rachel Cassidy⁽³⁾, John Caulfield⁽¹⁾, Katarina Pilatova⁽⁴⁾, Janka Nitsche⁽⁵⁾, Chris Wilson⁽⁶⁾, Zuansi Cai⁽¹⁾, Ray Flynn⁽¹⁾

⁽¹⁾ Queen's University Belfast, School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Northern Ireland (UK), ⁽²⁾ University of Aberdeen, School of Geosciences, Scotland (UK), ⁽³⁾ Agri-Food and Biosciences Institute, Sustainable Agri-Food Sciences Division, Northern Ireland (UK), ⁽⁴⁾ WYG plc, Belfast (UK), ⁽⁵⁾ AWN Consulting Ltd., Dublin (Ireland), ⁽⁶⁾ University of Ulster, School of Built Environment, Belfast (UK)

u.ofterdinger@qub.ac.uk, jc.comte@abdn.ac.uk, rachel.cassidy@afbini.gov.uk,
john.caulfield@qub.ac.uk, janka.nitsche@awnconsulting.com, katarina.pilatova@wyg.com,
c.wilson@ulster.ac.uk, r.flynn@qub.ac.uk, z.cai@qub.ac.uk

Plutonic and metamorphic basement rocks cover about 65% of the island of Ireland. Due to a humid climate and the abundance of surface water, groundwater in hard rock areas of Ireland has been overlooked as a water resource despite playing a crucial role in maintaining surface water and ecological habitats. The Griffith Geoscience Project (2007-2015) aims at improving the understanding of the structure and functioning of Irish hard rock aquifers, their relative importance as a water resource and their role within the Irish water cycle from local to catchment scale. Multidisciplinary hydrogeological research has been carried out in a number of contrasting geological settings, which included geological/structural analyses, geophysical investigations, hydraulic testing, geochemical and hydrochemical (including isotopes) sampling and numerical groundwater modelling. Recent results have demonstrated (1) a large diversity of aquifer types related to the bedrock geological structure, lithology and weathering patterns as well as the glacial history; (2) large spatial variations of hydrogeological properties between and within aquifer types; (3) the importance and a catchment scale organization of groundwater contribution to surface water, (4) the nature and timescale of groundwater recharge processes across aquifer types and overburden cover. The findings of this multidisciplinary study provide new insights for groundwater development, and more generally water resources management and protection, in hard rock areas within temperate climates.

Dénitrification dans les aquifères de socle : Etat des connaissances pour une gestion des eaux souterraines

Hélène Pauwels¹, Alexandre Boisson¹, Sarah Ben Maamar², Luc Aquilina²

¹ BRGM, Avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 02, France, ² Université de Rennes 1, Rennes, France;
h.pauwels@brgm.fr

La dénitrification, transformation des nitrates en une espèce gazeuse (N₂O ou N₂) qui peut s'échapper dans l'atmosphère, constitue un atout majeur pour la qualité des eaux, tant vis-à-vis du bon état des masses d'eau que de la qualité des eaux souterraines destinées à l'alimentation en eau potable. Ce processus est depuis longtemps connu pour opérer naturellement dans divers contextes géologiques et notamment dans les aquifères de socle à condition que les donneurs d'électrons appropriés soient disponibles. Ici, nous synthétisons un ensemble de travaux conduits à travers la Bretagne, région dont la qualité des eaux est fortement impactée par les activités agricoles, mais dont la contamination en nitrates reste malgré tout atténuée par la dénitrification dans les aquifères de socle. Des approches chimiques, isotopiques, microbiologiques, des approches expérimentales de terrain ou de laboratoire, ainsi que des travaux de modélisation sont développés pour acquérir les connaissances nécessaires à une gestion du processus.

Ainsi, plusieurs outils, notamment des isotopes du soufre et l'oxygène des sulfates, les isotopes du bore peuvent être mis à profit pour caractériser la nature du processus de dénitrification en aquifère de socle et également le distinguer des processus de dilution par des eaux anciennes notamment des eaux salées. Pourtant, des travaux récents montrent que la nature des donneurs d'électrons mis en jeu n'est pas totalement élucidée. Des facteurs, notamment physiques, qui favorisent ou conditionnent la mise en place du processus ont pu être mis en évidence. Différentes approches expérimentales (tests de traçage artificiels et push-pull sur le terrain, batchs et percolation en laboratoire) sont développées pour appréhender la cinétique du processus, élément déterminant pour sa modélisation et sa gestion. Les résultats expérimentaux obtenus ont pu être modélisés de façon convenable notamment en séparant chaque étape de la chaîne réactionnelle qui peut être caractérisée par des constantes cinétiques qui lui sont propres. La cinétique du processus est aussi conditionnée par la structure de l'aquifère de socle, induisant une forte variabilité spatiale dont des facteurs déterminant restent encore à identifier. L'impact à long terme du lessivage de l'aquifère par des eaux chargées en nitrates et l'évolution du processus de dénitrification ont encore été très peu abordés ; il s'agit pourtant d'un élément clef de la durabilité du processus.

Impact of MAR structure on groundwater quality in south-Indian crystalline aquifer: case study of Tumulur tank, Maheshwaram watershed.

**M. Alazard^{a,c}, A. Boisson^{a,c}, J-C. Maréchal^a, B. Dewandel^a, J. Perrin^a, M. Pettenati^a,
G. Picot-Colbeaux^a, S. Ahmed^{c,d} and W. Kloppmann^b**

^a BRGM, D3E Unit, France

^b BRGM, LAB Unit, France

^c Indo-French Center for Groundwater Research, Hyderabad, India

^d CSIR-National Geophysical Research Institute, Hyderabad, India

marina.alazard@gmail.com

Managed aquifer recharge structures are particularly widespread in arid and semi-arid contexts as in southern India. Their main purpose is to enhance groundwater availability under strong climatic and anthropogenic pressure. The groundwater quality is generally expected to be improved by dilution with fresh surface water regarding the most common markers of pollution (global mineralization, nitrates, chlorides, sulfates and fluoride contents).

The impact of a typical percolation tank on groundwater quality was investigated in south-Indian fractured aquifer context. Water level data and geochemical tools (stable isotopes and major ions) were used for both groundwater and surface water, over several successive monsoon events. It is found that, for a few cases, the quality of the groundwater can be negatively impacted due to leaching of salts under the tank, particularly during the first raining events of the monsoon.

On the opposite, in case of very high water levels, the groundwater quality is globally improved. However, the fluoride content in groundwater is found to be relatively stable over the year, pointing out that the fluoride salting-out processes, mainly led by cationic exchanges, is not impacted by the hydrological conditions. This work highlights the complexity of the recharge processes in crystalline aquifers, enhanced by the variability of hydrological conditions. It also provides insights of the possible risk for groundwater quality deterioration in cases of light and short monsoons periods.

Evaluation de l'état des masses d'eau souterraine en domaine de socle

D. Gabion⁽¹⁾, N. Baran⁽²⁾, B. Bourguine⁽²⁾, L. Gourcy⁽²⁾, A. Gutierrez⁽²⁾, B. Lopez⁽²⁾, V. Mardhel⁽²⁾,
S. Pinson⁽²⁾, P. Stollsteiner⁽²⁾, N. Surdyk⁽²⁾, D. Thiéry⁽²⁾, A. Wuilleumier⁽²⁾, GEOHYD

(1) Agence de l'Eau Loire-Bretagne - Direction de l'Evaluation et de la Planification -
damien.gabion@eau-loire-bretagne.fr (2) BRGM

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) fixe des objectifs et des méthodes pour atteindre le bon état des eaux souterraines d'ici 2015. L'évaluation de l'état des masses d'eau souterraine repose, entre autre, sur la prise en compte de paramètres chimiques incluant notamment des notions de représentativité du réseau de surveillance des masses d'eau, d'évaluation des tendances à la hausse des concentrations en substances polluantes et de relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Dans ce cadre, l'agence de l'eau Loire-Bretagne s'appuie sur des approches méthodologiques développées en partenariat avec le BRGM afin d'améliorer l'évaluation de l'état des eaux souterraines en domaine de socle. Parmi elles, la possibilité d'une interrelation entre les mesures observées dans les eaux souterraines et les eaux de surface et la faisabilité d'intégration des stations « cours d'eau » dans l'analyse des masses d'eau souterraine de socle ont été étudiées. Un classement des stations selon la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et une spatialisation par la méthode des diagrammes de Voronoï, montrent que l'intégration des stations qualité « cours d'eau » permettrait de combler une absence de représentativité par les stations RCS (station qualité eau souterraine).

Par ailleurs, la DCE définit toute augmentation de la concentration d'un paramètre dans les eaux souterraines comme significative lorsque qu'une inversion de tendance est considérée comme nécessaire pour respecter les objectifs de bon état des masses d'eau souterraine. L'estimation des tendances d'évolution de la qualité des eaux souterraines peut être réalisée à partir des chroniques de données chimiques disponibles, d'un outil statistique (HYPER) et de scénarios d'évolution. Les relations nappes/rivières peuvent être évaluées par l'estimation de la contribution des eaux souterraines au débit des cours d'eau, une approche qualitative, quantitative et une évaluation du comportement des eaux souterraines dans leur contribution au débit et à la qualité des cours d'eau, avec un test sur le paramètre nitrates. Cette étude s'appuie sur une combinaison de méthodes innovantes (IDPR, GARDENIA et TEMPO) relatives à la compréhension des mécanismes qui sont à l'origine des relations nappes-rivières. La démarche analytique constitue un gain de puissance pour la connaissance et pour la gestion des eaux souterraines. Enfin, l'amélioration significative de la qualité des eaux souterraines n'est pas toujours perceptible sur de courtes périodes. Dans ce cadre, une modélisation des concentrations en nitrates dans la nappe à partir de l'occupation des sols, des pratiques agricoles, et des paramètres hydroclimatiques (Baran et al. 2011) a montré un réel intérêt dans la simulation de scénarii. Ceux-ci permettent d'alerter la collectivité sur l'évolution prévisible des concentrations en nitrates si aucune mesure n'est prise ou de montrer l'impact de changements de pratiques culturales envisagés sur l'évolution de la qualité des eaux.

Références bibliographiques :

BARAN N., GUTIERREZ A., LOPEZ B., SURDYK N., GOURCY L. (2011) - Transfert de nitrates à l'échelle du bassin d'alimentation de captages d'eau souterraine du bassin Loire-Bretagne: modélisation et datation. Rapport final BRGM/RP-60280-FR.

GUTIERREZ A., SURDYK N., LOPEZ B., BARAN N., THIÉRY D. (2012) - Quelques exemples de simulation de l'évolution des concentrations de nitrates dans la nappe à l'échelle du bassin d'alimentation des captages. Poster présenté à INTERSOL 2012. 27-30 mars 2012, Paris.

Pinson. S, Allier D, Stollsteiner P, Mardhel .V, Wuilleumier. A, (2010) - Etude de la contribution des eaux souterraines aux écoulements totaux des Masses d'eau de surface sur le bassin Loire-Bretagne Rapport final. Rapport BRGM RP-57608-FR, 164 p, 135 illustrations, 3 annexes

SURDYK N., GUTIERREZ A., LOPEZ B., BARAN N., THIÉRY D. (2012)- BICHE: un outil d'application simple de simulation de concentrations en nitrates dans les nappes à l'échelle du bassin versant. Communication à INTERSOL 2012. 27-30 mars 2012, Paris.

GEOHYD (2009)- Calcul statistique de la qualité des masses d'eau souterraine du bassin Loire-Bretagne.

Définition d'une méthodologie de dimensionnement des zones de protection des ouvrages de captages d'eaux souterraines en zone de socle. Cas de la zone test du bassin versant d'Ehania (Sud-est de la Côte d'Ivoire)

Dibi Brou¹ et Valérie Plagnes²

(1) : Université Jean Lorougnon Guedé, BP 150 Daloa (Côte d'Ivoire) ; dibrou2003@yahoo.fr

(2) : Université Pierre Marie Curie, UMR MÉTIS (ex sysiphe) - case courrier 105, 4 place Jussieu - 75252 Paris Cedex 05 - France, valerie.plagnes@upmc.fr

La protection des aquifères constitue une préoccupation majeure pour les autorités surtout dans les zones où il existe d'importantes exploitations agroindustrielles. L'objectif de cette étude est de définir une nouvelle méthode de protection des aquifères à partir des caractéristiques des ouvrages et des aquifères. La méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, PaPRI a été utilisée. Elle constitue une variante de la méthode PaPRIka appliquée en milieu karstique qui a fait l'objet d'une adaptation aux lieux de socles fissurés en tenant compte des caractéristiques de ce milieu. PaPRI signifie la protection des aquifères (Pa) évaluée à partir de trois critères :

P pour la protection (l'examen des aspects les plus protectrices entre les paramètres liés à la couverture du sol, zone non saturée et la couche altérite),

R pour le type de roche,

I représente l'infiltration.

C'est une méthode basée sur la pondération des différents critères. Les résultats obtenus font ressortir 3 classes qui évoluent des classes dites faibles (27 %) aux classes fortes (28 %) en passant par celles dites moyennes (45 %). Les classes fortes qui traduisent une forte vulnérabilité et donc très exposée à la pollution sont plus présentes dans la partie centre – nord et quelques apparitions vers le sud. Ces présences pourraient plus être liées à la topographie du fait des pentes souvent très élevées observées dans la zone. L'importance de cette méthode réside dans l'intégration du paramètre épaisseur d'altérite qui influence fortement la migration des polluants vers les nappes en fonction de sa nature et de son épaisseur.

Une méthodologie de délimitation des périmètres deprotection rapprochés des captages d'eau souterraine en Bretagne

Marjolet G, Herbreteau F, Le Gal A

Hydrogéologue agréé, retraité du Conseil général des Côtes d'Armor

Bureau d'études Log Hydro (22170 Bringolo)

Eau du Morbihan (56000 Vannes)

Marjolet.gilles@gmail.com

contact@log-hydro.fr

arnaud.le-gal@eaudumorbihan.fr

Depuis une trentaine d'années, les périmètres de protection des captages (eaux souterraines et superficielles) établis en Bretagne, s'appuient sur des protocoles d'accord départementaux. Ceux-ci, qui intègrent, dans la préconisation des servitudes, la pollution diffuse d'origine agricole, prévoient, pour les eaux souterraines, la subdivision des périmètres de protection rapprochée en deux zones distinctes : la zone sensible, à contraintes fortes (mise en prairies permanente obligatoire, par exemple) et la zone complémentaire, à plus faibles contraintes.

L'absence de méthodologie de délimitation de ces périmètres, dans le contexte particulier du socle armoricain et notamment pour les forages profonds, a pour conséquence des différences importantes, non justifiées, dans les propositions des bureaux d'études et dans les avis des hydrogéologues agréés, ainsi que dans les applications règlementaires des services administratifs départementaux. Dans certains cas, une extension très importante des zones sensibles a pu conduire à l'abandon de projets de captage.

Une concertation s'est donc engagée entre les hydrogéologues agréés bretons, organisée par les coordonnateurs départementaux, dans le cadre de « l'animation technique » prévue par l'arrêté du 15 mars 2011 (article 5) sur les modalités d'intervention des hydrogéologues agréés. Une méthodologie a ainsi été proposée et discutée, en 2014, à partir d'un cas particulièrement significatif.

Cette méthodologie qui s'appuie sur l'expérience acquise depuis une quarantaine d'année, suite aux recherches en eau souterraine dans le socle armoricain, repose sur la prise en compte de données sur la nature et l'épaisseur des altérations, la profondeur des arrivées d'eau, les niveaux piézométriques (avant et après pompage) et la qualité des eaux, données recueillies sur un nombre suffisant de piézomètres. Elle suppose donc la réalisation d'une étude hydrogéologique préalable appropriée. Il est donc nécessaire que les cahiers des charges de ces études intègrent ces considérations.

SESSION 3

FONCTIONNEMENT, GESTION ET MODELISATION DES AQUIFERES DE SOCLE

**FUNCTIONING OF HRA.WATER RESSOURCE MANAGEMENT
AND MODELING OF HRA**

POSTERS

P3-1

Caractérisation des écoulements et de l'altération dans les milieux fissurés instables à partir de l'hydrochimie : exemple du versant de socle de Séchilienne (38)

Catherine Bertrand, Aurélien Vallet et Jacques Mudry

OSU-THETA-Laboratoire de Chrono-Environnement 16 Route de Gray, 25030 Besançon cedex

Les instabilités de versant sont généralement déclenchées par des facteurs hydrologiques et hydrogéologiques qui conditionnent l'infiltration, et augmentent la pression d'eau interstitielle [1-3]. L'effet de l'eau sur ces versants se traduit à la fois par une dégradation chimique et mécanique [4-6]. Dans ces mouvements de versants rocheux de grande ampleur, les méthodes hydrogéologiques classiques ne permettent pas toujours d'appréhender la circulation des fluides (problème de métrologie, durée de vie des appareils de mesures). C'est pourquoi l'hydrochimie est utilisée afin de caractériser l'origine de l'infiltration et le transit des flux d'eau dans ces versants fissurés [7].

A Séchilienne, les analyses chimiques réalisées sur les différents exutoires des différents sites ont la particularité d'avoir un signal chimique contrasté. C'est le cas de deux faciès chimiques qui ont la particularité de traduire des écoulements sur la zone stable et la zone instable du massif. Ces groupes se distinguent essentiellement par les concentrations en sulfates plus importantes dans la zone instable que dans la zone stable. Ces fortes concentrations en sulfates peuvent s'expliquer par deux mécanismes liés à la déformation du versant : soit une création et/ou une fermeture de fractures et fissures modifiant les chemins de circulation, soit un mécanisme de friction et/ou broyage le long des fractures de zones très déformées entraînant un rafraîchissement des surfaces réactives de la pyrite. La variabilité de minéralisation des différents points de mesures sur la zone instable provient de l'hétérogénéité du milieu (distribution des minéraux au sein du socle et fracturation) alors que la minéralisation des sources du versant stable traduit une altération en condition normale de la roche. Par ailleurs, une analyse détaillée des variations de la conductivité électrique sur deux années hydrologiques met en évidence l'influence de la recharge dans la zone instable, traduisant un milieu réactif contrairement à la zone stable où le milieu est plus inertiel. Outre les conditions d'écoulements proprement dites (impact des écoulements préférentiels notamment), l'interaction eau-matrice et la nature chimique résultante des eaux revêtent probablement une grande importance dans la dégradation du massif. Les instabilités de versants sont donc des sites expérimentaux qui permettent d'apporter des éléments de réponse sur les mécanismes de l'altération de roches de socle en accélérant « naturellement » certains paramètres comme les cinétiques de dissolution.

[1] Van Asch T.W.J., Buma J., Van Beek L.P.H., 1999- A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology* 30, 25–32. doi:10.1016/S0169-555X(99)00042-2

[2] Iverson R. M. 2000- Landslide triggering by rain infiltration, *Water Resour. Res.*, 36(7), 1897–1910, doi:10.1029/2000WR900090,

[3] Guglielmi Y., Cappa F., Binet S., 2005- Coupling between hydrogeology and deformation of mountainous rock slopes: Insights from La Clapière area (southern Alps, France). *Comptes Rendus Geoscience* 337, 1154–1163. doi:10.1016/j.crte.2005.04.016

[4] Matsukura Y., 1996- The role of the degree of weathering and groundwater fluctuation in landslide movement in a colluvium of weathered hornblende-gabbro. *CATENA* 27, 63–78. doi:10.1016/0341-8162(96)00012-4

[5] Cervi F., Ronchetti F., Martinelli G., Bogaard T.A., Corsini A., 2012- Origin and assessment of deep groundwater inflow in the Ca' Lita landslide using hydrochemistry and in situ monitoring. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 4205–4221. doi:10.5194/hess-16-4205-2012

[6] Cappa F., Guglielmi Y., Viseur S., Garambois S., 2014- Deep fluids can facilitate rupture of slow-moving giant landslides as a result of stress transfer and frictional weakening. *Geophys. Res. Lett.* 41, 2013GL058566. doi:10.1002/2013GL058566

[7] Bogaard T., Guglielmi Y., Marc V., Emblanch C., Bertrand C., Mudry J., 2007- Hydrogeochemistry in landslide research: a review. *Bulletin de la Société Géologique de France* 178, 113–126. doi:10.2113/gssgfbull.178.2.113

P3-2

Influence de la structure de l'aquifère de socle altéré et fissuré sur son fonctionnement en zone tropicale humide du sud Cameroun.

André Firmin Bon^{1-2*}, Jules Rémy Ndam Ngoupayou², Auguste Ombolo¹, Guillaume Ewodo Mboudou¹⁻², Georges Emmanuel Ekpdeck²

¹Institut Supérieur du Sahel, Université de Maroua, BP 46 Maroua.

²Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, BP 812 Yaoundé.

bon_andr@yahoo.com; jrndam@gmail.com; ombodeleb@yahoo.fr; guillaume_ewodo@yahoo.fr; gemekodeck@hotmail.fr.

En domaine de socle, comme c'est le cas dans le bassin de l'Olézoa, au Centre sud du Cameroun, les eaux souterraines sont situées au sein de deux unités aquifères superposées : celui des altérites et celui du milieu fissuré ou fracturé [1]. Il est généralement admis qu'en zone tropicale humide, les nappes d'altérites du socle sont à faible profondeur et rechargées annuellement. De même, les fluctuations de ces nappes sont principalement contrôlées par les précipitations efficaces [2], avec des hausses piézométriques pendant la grande saison pluvieuse et inversement pendant la saison sèche. La présente étude, fondée uniquement sur le suivi de la piézométrie en rapport avec la structure de l'aquifère, démontre que le modèle hydrodynamique généralement admis peut être contradictoire. Trente-trois puits ont été suivis entre mai 2010 et avril 2011. Ces puits ont un diamètre interne de l'ordre de 1 m avec des profondeurs comprises entre 1 et 15 m. Le fond de certains puits repose sur les matériaux meubles (argilo-sableux ou sablo-argileux) alors que d'autres sont forés jusqu'au substratum imperméable ou sur la partie altérée d'une discontinuité géologique. Les fluctuations piézométriques de la majorité des puits sont à l'image du modèle hydrodynamique généralement admis au sein des nappes d'altérites du socle. D'autres présentent une baisse des niveaux piézométriques au cours de la grande saison pluvieuse. Cette dynamique inverse est assimilée à la structure de l'aquifère indiquant alors une complexité dans le fonctionnement des aquifères de socle. Ces derniers peuvent donc être considérés comme une mosaïque de petits systèmes quasiment indépendants les uns des autres.

Mots clés : Structure, Fonctionnement, aquifère de socle, Olézoa, Sud-Cameroun

Références Bibliographiques

- [1] 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. 10, 1365-3121
- [2] Owor M, Taylor R. G., Tindimugaya C., Mwesigwa D., 2009 - Rainfall intensity and groundwater recharge: empirical evidence from the Upper Nile Basin. Environ. Res. Lett. 4, 035009.

P3-3

SIGES Bretagne : le premier portail de référence pour la gestion des eaux souterraines en zone de socle

Damien Gabion⁽¹⁾, Bruno Mougin et Flora Lucassou⁽²⁾

(1) Agence de l'Eau Loire-Bretagne - Direction de l'Evaluation et de la Planification -
Service de l'Evaluation - Eaux souterraines - 9 avenue Buffon - CS 36339 - 45063 Orléans Cedex 2
Damien.gabion@eau-loire-bretagne.fr

(2) BRGM - Direction des Actions Territoriales - Direction Régionale Bretagne - Rennes Atalante
Beaulieu 2, rue de Jouanet - 35700 Rennes - France
b.mougin@brgm.fr; f.lucassou@brgm.fr

L'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, le Conseil Régional de Bretagne et le BRGM se sont associés début 2011 pour concevoir un portail Internet dédié à la gestion des eaux souterraines appelé « SIGES Bretagne » (Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines de Bretagne, <http://sigesbre.brgm.fr/>).

Ce site Internet, ouvert au public en septembre 2012, a pour objectifs de mutualiser, fédérer et diffuser toutes les informations existantes sur les eaux souterraines de la région Bretagne.

À l'heure où les problématiques sociétales et environnementales, et plus particulièrement la gestion raisonnée des ressources en eau, constituent des défis majeurs pour les sociétés, il est indispensable que chaque citoyen et chaque acteur (experts, professionnels, élus, collectivités, bureaux d'études, grand public...) disposent d'informations qui nourriront le débat public et faciliteront la prise de décision.

Entièrement gratuit et libre d'accès, le SIGES Bretagne est utilisable et compréhensible par tous, et s'adapte au niveau de spécialisation de l'utilisateur (mentionné par des pictogrammes expert, scolaire, grand public).

La phase 1 du projet, qui s'est déroulée de 2011 à 2012 [1], a permis d'alimenter le site avec : 7 rubriques thématiques (Géologie, Hydrogéologie, Quantité, Qualité, Vulnérabilité, Géothermie et Législation) subdivisées en 34 sous-rubriques comportant près de 90 articles illustrés par environ 140 iconographies (photos, schémas, tableaux, documents téléchargeables...), et 32 couches cartographiques géoréférencées et interopérables. Par ailleurs, des documents inédits ont été spécialement réalisés : fiches de synthèse hydrogéologique des entités BD LISA niveau 3 (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères), cartographie des périmètres de protection des captages souterrains, synthèse des recherches en eau souterraine pour l'eau potable, inventaire et historique des prélèvements d'eau souterraine déclarés.

Un bilan sur la fréquentation du SIGES Bretagne, effectué 2 ans après sa mise en ligne, montre que le site est visité en moyenne : 12 140 fois/an, 1 011 fois/mois, et 32 fois/jour.

La phase 2 du projet est actuellement en cours (2014-2015) et elle permettra d'enrichir les contenus éditoriaux et cartographiques du site.

Référence bibliographique :

[1] B. Mougin, F. Lucassou, O. Morel, J-M. Schroëtter, B. Marmu, L. Guillemain, avec la collaboration de H. Pesqueux, A. Cuillerier et G-V. Tagne Kamgue (2013) - SIGES Bretagne : constitution d'un Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines en région Bretagne. Rapport final BRGM/RP-61885-FR, 68 p., 30 ill., 3 annexes.

P3-4

Estimation de la recharge des aquifères de socle au Bénin: approche couplée hydrochimique et piézométrique

Kotchoni, V.⁽¹⁾; Vouillamoz, J.M.⁽²⁾; Boukari, M.⁽³⁾; Adihou, C.⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Université d'Abomey-Calavi/Institut National de l'Eau, valerie.kotchoni@ird.fr

⁽²⁾ IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, jean-michel.vouillamoz@ird.fr

⁽³⁾ Université d'Abomey-Calavi/Institut National de l'Eau, moussaboukari2003@yahoo.fr

⁽⁴⁾ IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, aaconsolas@gmail.com

Les réserves en eau souterraine des aquifères de socle au Bénin ont récemment été évaluées à 440mm en moyenne [1]. L'objectif de la présente étude est de quantifier le renouvellement de ces réserves (la recharge). Pour quantifier la recharge mais également pour en comprendre les processus dominants, l'application conjointe de méthodes complémentaires est recommandée [2]. Dans notre étude, nous avons réalisé des suivis hydrochimiques, piézométriques et pluviométriques sur 6 sites expérimentaux répartis dans des unités géologiques différentes de socle du Bénin. Sur chacun des sites expérimentaux, nous avons utilisés des piézomètres captant la totalité de l'épaisseur de l'altération non-consolidée (zone altérée ZA) et des piézomètres voisins ne captant que la totalité de la zone fissurée altérée (ZFA).

Nos premiers résultats indiquent que les faciès chimiques des eaux de pluie et des eaux souterraines des différents sites, aussi bien pour la ZA que la ZFA, sont proches. De même, les analyses de Deutérium et d'Oxygène 18 de l'eau souterraine de la ZA et de la ZFA indiquent une signature d'eau de pluie actuelle. Les teneurs en Tritium de l'eau dans la ZA sont celles des eaux de pluie actuelles, tout comme les valeurs relevées dans la ZFA pour 5 des 6 sites expérimentaux. Enfin, les valeurs de conductivités de l'eau souterraine en fonction de la profondeur enregistrées après la mousson indiquent une dilution de l'eau souterraine par rapport aux valeurs relevées avant la mousson dans la ZA et partiellement dans la ZFA pour la majorité des sites. Nous concluons que la recharge est directe, actuelle et concerne la ZA et partiellement la ZFA.

L'analyse conjointe des variations piézométriques et des précipitations nous a permis de quantifier la recharge à 22% de la pluie en moyenne pour l'année 2014: environ 60% des réserves seraient ainsi renouvelé annuellement. Enfin, les vitesses d'infiltration moyenne observées semblent indiquer que la recharge s'effectue au travers de la matrice poreuse sur tous les sites, mais également par des voies préférentielles sur 2 des 6 sites expérimentaux.

Ce travail va continuer en 2015 et de nouveaux sites d'observation vont être ajoutés aux 6 existants.

Références bibliographiques :

[1] Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2015. Groundwater in hard rocks of Benin: Regional storage and buffer capacity in the face of change. *Journal of Hydrology* 520, 379–386. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.024

[2] Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10, 18–39..

P3-5

Quantification des réserves en eau souterraine dans les aquifères de socle africain: comparaison des premiers résultats obtenus au Bénin, au Burkina Faso et en Ouganda

Vouillamoz, J.M.⁽¹⁾; Lawson, F.M.A.^(1,2); Yalo, N.⁽²⁾; Koita, M.⁽³⁾; Owor, M.⁽⁴⁾
Okullo, J.⁽⁴⁾; Tindimugaya, C.⁽⁵⁾

(1) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, jean-michel.vouillamoz@ird.fr

(2) Université d'Abomey-Calavi/Institut National de l'Eau, lawson.amen@yahoo.fr

(3) Fondation 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso, mahamadou.koita@2ie-edu.org

(4) Makerere University, Kampala, Uganda, mowor@cns.mak.ac.ug

(5) Water Resources Management Directorate, Entebbe, Uganda, callist.tindimugaya@mwe.go.ug

La quantification des réserves en eau souterraine est importante car elle permet de connaître les volumes disponibles à un moment donné pour les différents usages humains, mais également la capacité des aquifères à amortir les changements attendus dans les termes du bilan d'eau (augmentation des prélèvements, évolution pluviométrique, etc...). Cependant, les réserves en eau souterraine sont mal quantifiées notamment dans les zones de socle qui couvrent environ 40% de la superficie du continent africain. Cette étude vise à mieux quantifier et comparer les réserves en eau souterraine dans trois pays de socle: le Bénin, l'Ouganda et le Burkina Faso. Pour ce faire, nous avons utilisé les dernières avancées dans l'application de la méthode géophysique de Résonance Magnétique Protonique (RMP) [1]. Nous avons réalisé des sondages RMP dans différents faciès géologiques de socle au Bénin (43 sondages), en Ouganda (7 sondages) et au Burkina Faso (7 nouveaux sondages plus 13 sondages réinterprétés de [2]). L'interprétation des mesures géophysiques en termes de stock d'eau RMP indique pour les 3 pays un stock plus élevé dans les gneiss/migmatites que dans les granitoïdes. L'essentiel de l'eau stockée dans les roches volcano-sédimentaires n'est pas drainable et le stock gravitaire tend vers zéro. Au Bénin, nous avons converti ces stocks RMP en stocks hydrogéologiques en utilisant des fonctions de conversion établies sur 6 sites expérimentaux [3]. Nous avons trouvé que le stock moyen est de 540 mm dans les gneiss/migmatites et 300 mm dans les granitoïdes. La prochaine étape de ce travail consiste à établir les fonctions de conversion entre signaux RMP et grandeurs hydrogéologiques au Burkina et en Ouganda, et à vérifier si ces fonctions sont identiques dans les 3 pays.

Références bibliographiques :

[1] Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2014. The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: The example of Benin. *Journal of Applied Geophysics* 107, 16–24. doi:10.1016/j.jappgeo.2014.05.012

[2] 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, 205–213.

[3] Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2015. Groundwater in hard rocks of Benin: Regional storage and buffer capacity in the face of change. *Journal of Hydrology* 520, 379–386. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.11.024

P3-6

Bilan et perspectives des recherches d'eau dans le Morbihan Site de l'Aff et relations eau de surface/eau souterraine

Arnaud Le Gal⁽¹⁾, Flora Lucassou⁽²⁾ et Benoit Dewandel⁽³⁾

(1) Eau du Morbihan (Vannes)

(2) BRGM - Direction des Actions Territoriales - Direction Régionale Bretagne (Rennes)

(3) BRGM – Direction Eau, Environnement et Ecotechnologie – Unité NRE (Montpellier)

arnaud.le-gal@eaudumorbihan.fr, f.lucassou@brgm.fr, b.dewandel@brgm.fr

Entièrement en socle, le Morbihan est alimenté en eau potable à 80 % à partir de ressources superficielles. Historiquement limitées à quelques puits et captages de sources, les eaux souterraines ont été explorées dès la fin des années 1970, avec un développement important depuis une quinzaine d'années. Sur le territoire où Eau du Morbihan exerce sa compétence, une dizaine de sites de production d'eau souterraine profonde ont été mis en service depuis 2000 pour un total de plus de 400 m³/h. La mise en exploitation de 300 m³/h supplémentaires, ainsi que des recherches d'eau complémentaires sont programmées.

Pour mettre en évidence ces ressources, plusieurs étapes sont nécessaires, des études préliminaires aux essais de pompage. Les difficultés sont nombreuses, notamment les négociations de terrain et la perspective des périmètres de protection, avec parfois des échecs dans certains contextes géologiques. La mise en production nécessite des démarches administratives longues et des investissements importants. Malgré tout, ces eaux souterraines profondes présentent un certain intérêt, que ce soit qualitatif grâce à la dénitrification naturelle et quantitatif en adéquation avec les besoins locaux et les pointes de consommation, participant ainsi à la diversification et à la sécurisation de l'alimentation en eau potable.

Le principal site de production d'eau souterraine du Morbihan est situé à Beignon. Trois forages ont été mis en service en 2011 pour un débit total de 125 m³/h, situés à proximité d'un cours d'eau, l'Aff, affecté régulièrement par des assecs en étiage. Une réinterprétation des essais de pompage de 2007 [1] et 2010 [2] a été réalisée par examen des pentes de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements en fonction du temps [3] [4] [5], dans le but de mettre en évidence un éventuel lien entre l'aquifère capté et l'Aff. Des analyses chimiques et isotopiques de l'eau des trois forages et de l'Aff en amont de ces ouvrages ont été réalisées afin d'identifier l'origine de l'eau captée.

Références bibliographiques :

[1] Terre et Habitat, 2008. Rapport de phase n°3 : réalisation des ouvrages d'exploitation et réalisation de pompages d'essai. Mai 2008, 49 p.

[2] Terre et Habitat, 2011. Site de la vallée de l'Aff : interprétation de pompages d'essai réalisés à la fin de l'année 2010. Juin 2011, 26 p.

[3] Bourdet, Whittle T.M., Dougals, A.A., Pirard V.M., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis, *World Oil*.

[4] Bourdet D., Ayoud J.A. and Pirard Y.M., 1989. Use of pressure derivative in well-test interpretation. *SPE*, 293-302.

[5] Spane F.A. and Wurstner S.K., 1993. DERIV: a computer program for calculating pressures derivatives for use in hydraulic test analysis.

P3-7

Elaboration d'indicateurs piézométriques en zone de socle pour la gestion quantitative du département des Côtes d'Armor

Flora Lucassou et Bruno Mougin ⁽¹⁾

(1) BRGM - Direction des Actions Territoriales - Direction Régionale Bretagne - Rennes Atalante
Beaulieu - 2, rue de Jouanet - 35700 Rennes - France

f.lucassou@brgm.fr; b.mougin@brgm.fr

Le projet « Essai d'élaboration d'indicateurs piézométriques pour la gestion quantitative de l'eau potable du département des Côtes d'Armor » a été réalisé en 2013-2014 grâce à la collaboration du Conseil Général (CG22), du Syndicat Départemental d'Alimentation en Eau Potable, de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et du BRGM. L'objectif de l'étude est de produire des indicateurs piézométriques permettant d'améliorer la gestion des 3 principales retenues destinées à l'alimentation en eau potable (barrages de la Ville Hatte sur l'Arguenon, de Saint-Barthélémy sur le Gouët, et de Kerné Uhel sur le Blavet). Le CG22 souhaite disposer d'outils permettant d'anticiper le remplissage des retenues, afin d'assurer la distribution d'eau à l'étiage.

La définition d'indicateurs en zone de socle à partir de chroniques piézométriques de durée inférieure à 10 ans constitue un test méthodologique (les 12 piézomètres des Côtes d'Armor sont opérationnels depuis 2003-2004-2005) puisque les études existantes ont été réalisées sur des piézomètres à chroniques plus longues en milieu sédimentaire [1].

Suite à une analyse approfondie des données disponibles (dynamique-inertie-cyclicité-vitesse de baisse des nappes, autocorrélation/corrélation débit-piézométrie, décalage temporel...), le projet a consisté à définir sur le bassin versant de chaque rivière étudiée un piézomètre de référence associé à la station hydrométrique la plus représentative de l'écoulement naturel. Des modélisations globales pluie - niveau piézométrique - débit des rivières réalisées avec le logiciel GARDENIA ont permis d'entériner chaque association. Les chroniques piézométriques ont été étendues en utilisant des ouvrages plus anciens présents dans les autres départements.

Ce test méthodologique s'est avéré concluant puisque le projet a permis : (i) de définir des seuils piézométriques et (ii) d'obtenir des abaques de corrélation débit - niveau piézométrique [2].

Les outils obtenus permettront au CG22 d'anticiper sa gestion de l'étiage, d'estimer le débit le plus critique de chaque rivière à partir de mesures piézométriques, et de justifier ses demandes de dérogation au débit réservé à l'étiage de la rivière à l'aval des barrages.

Références bibliographiques :

[1] Seguin J.J. (2009) - Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes - Orientations méthodologiques. Rapport BRGM/RP-58139-FR, 115 p., 113 fig.

[2] Lucassou F., Mougin B. avec la collaboration de P. Stollsteiner et J.-J. Seguin (2014) - Essai d'élaboration d'indicateurs piézométriques pour la gestion quantitative AEP dans le département des Côtes d'Armor. Rapport final. BRGM/RP-64123-FR.

P3-8

Calcul des volumes d'eau souterraine sur 12 bassins versants bretons en zone de socle et apports sur les temps moyens de résidence des eaux souterraines

Bruno Mougin ⁽¹⁾

(1) BRGM - Direction des Actions Territoriales - Direction Régionale Bretagne - Rennes Atalante
Beaulieu - 2, rue de Jouanet - 35700 Rennes - France

b.mougin@brgm.fr

Une des étapes du projet « SILURES Bretagne » (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eau Souterraine), mené de 2002 à 2008, a consisté à modéliser les hydrogrammes des rivières bretonnes afin de connaître la participation des eaux souterraines au débit de ces rivières. En s'appuyant sur le schéma conceptuel des aquifères de socle [1], 70 modélisations globales pluie-débit ont été réalisées au pas de temps journalier avec le logiciel BRGM Gardénia [2].

Sur 12 des 70 bassins versants étudiés en zone de socle (l'Elorn, l'Aulne, le Yar, l'Horn, le Coët-Dan, le Dourduff, la Maudouve, la Noë sèche, l'Oust, l'Yvel, le Nançon et l'Aron), les volumes d'eau souterraine ont été calculés sur les 50 premiers mètres du sous-sol (dans le cadre de 5 études menées entre 2003 et 2014). A partir d'une modélisation des épaisseurs des aquifères (altérites et milieu fissuré) dans les roches constituant le sous-sol du bassin versant, et des teneurs en eau libre mesurées grâce à des sondages de Résonance Magnétique Protonique, le volume d'eau souterraine est approché [1].

Connaissant le débit souterrain moyen annuel sortant d'un bassin versant et le volume d'eau souterraine, ainsi que la vitesse moyenne que met une goutte d'eau à passer du sol à la nappe [3], des temps moyens de résidence des eaux souterraines ont été calculés (temps moyen que met une goutte d'eau à s'infiltrer du sol à la nappe, puis de la nappe à la rivière). Ces temps sont très variables (de 2 à 8 ans) selon la géologie du bassin et des pluies efficaces l'alimentant.

Ces temps de résidence ne correspondent pas à des temps de reconquête de la qualité de l'eau en raison des phénomènes de mélange qui se déroulent entre le sol et la nappe, dans les altérites et dans le milieu fissuré. Par contre, ce sont des temps minimums en deçà desquels il est utopique d'attendre des résultats tangibles sur la qualité des nappes et ensuite sur les cours d'eau, en réponse à une action de surface.

Références bibliographiques :

[1] WYNS, R., J. M. BALTASSAT, P. LACHASSAGNE, A. LEGCHENKO, J. VAIRON and F. MATHIEU, Application of Magnetic Resonance Soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), Bulletin de la Société Géologique de France t. 175 (1) (2004) 21-34.

[2] B. MOUGIN, D. ALLIER, R. BLANCHIN, A. CARN, N. COURTOIS, C. GATEAU, E. PUTOT, collaboration J-P. JEGOU, P. LACHASSAGNE, P. STOLLSTEINER et R. WYNS (2008) - SILURES Bretagne - Rapport final - Année 5 - BRGM/RP-56457-FR

[3] C. GASCUEL-ODOUX, P. MÉROT (1986). Variabilité du transfert de l'eau dans le sol : utilisation du traçage et analyse géostatistique. Journal of Hydrology, n°89, 93-107.

P3-9

Contribution des eaux souterraines aux écoulements des masses d'eau de surface du Bassin Loire-Bretagne : application au socle

S. Pinson, D. Allier, V. Mardhel, P. Stollsteiner, A. Wuilleumier

BRGM

s.pinson@brgm.fr

L'objectif de ce projet est de réaliser une approche novatrice en évaluant la contribution moyenne des eaux souterraines aux écoulements de surface, à l'échelle des masses d'eau du bassin Loire-Bretagne. Les relations entre les deux réservoirs que constituent d'une part les aquifères et d'autre part les eaux de surface sont complexes, décalées dans le temps et complémentaires (prise directe (karst), autorégulation et amplification des phénomènes extrêmes (inondations)). En raison même de cette complémentarité, il est apparu nécessaire de quantifier la contribution moyenne des eaux souterraines aux eaux de surface, en réalisant une étude pilote, qui s'appuie sur une combinaison de méthodes innovantes (IDPR : Indice de développement et de persistance des réseaux, et des modélisations GARDENIA / TEMPO) relatives à la compréhension des mécanismes qui sont à l'origine des relations nappes-rivières.

Ce projet a été mené en plusieurs étapes : une approche qualitative accompagnée de la définition d'une typologie, une approche quantitative adaptée au contexte spécifique du bassin versant, une classification typologique des bassins versants et une évaluation du comportement des eaux souterraines dans leur contribution au débit et à la qualité des cours d'eau, avec un test sur le paramètre « nitrates ».

L'aboutissement de l'approche qualitative est une classification, selon 10 grands types, des bassins versants avec une différenciation du Massif armoricain (trois zones), une distinction très nette de comportements entre le Massif armoricain et le Massif central et des zones de transition entre le sédimentaire et le socle mieux appréhendées. Pour la partie quantitative, des bassins versants répartis sur le domaine de socle ont été modélisés grâce aux logiciels TEMPO et GARDENIA du BRGM. Cette approche a permis d'estimer un pourcentage de "lent simulé" qui correspond à la contribution moyenne des eaux souterraines au débit de la rivière. Ces données issues des modélisations ont été ensuite croisées avec les données qualitatives afin de rechercher des corrélations. Pour le domaine de socle, une relation entre le QMNA5 (valeur du débit mensuel d'étiage ayant la probabilité 1/5), le débit moyen et le lent simulé a été mise en évidence.

Cette relation a ainsi permis de calculer le pourcentage de contribution moyenne des eaux souterraines aux débits des rivières sur l'ensemble des bassins versants non modélisés, mais possédant une station de jaugeage, et ainsi de couvrir une grande partie du socle appartenant au bassin Loire-Bretagne .

Références bibliographiques :

Pinson. S, Allier D, Stollsteiner P, Mardhel .V, Wuilleumier. A, (2010) - Etude de la contribution des eaux souterraines aux écoulements totaux des Masses d'eau de surface sur le bassin Loire-Bretagne Rapport final. Rapport BRGM RP-57608-FR,164 p, 135 illustrations, 3 annexes

P3-10

Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines de dans le bassin versant du Sassandra (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)

Th. K. Yao ^{1*}, O. Fouché ², M-S Oga ³

1. Université Félix Houphouët-Boigny Cocody Abidjan, UFR-STRM, 22 BP 582 Abidjan 22 Côte d'Ivoire +225 05 00 01 07, koffiyao@ymail.com
 2. Conservatoire national des arts et métiers de Paris, Dépt ICENER Service de Géotechnique 2 rue Conté, 75003 Paris, France, +33 1 40 27 24 27, olivier.fouche_grobla@cnam.fr
 3. Université Félix Houphouët-Boigny Cocody Abidjan, UFR-STRM, 22 BP 582 Abidjan 22 Côte d'Ivoire +22507 85 62 46 oga_oms@yahoo.fr
- * Auteur correspondant : koffiyao@ymail.com

Le substratum ivoirien est constitué à 97 % de roches plutoniques et métamorphiques par conséquent, l'essentiel des ressources en eau souterraine est contenu dans les réservoirs du socle fracturé et dans les altérites [1,3]). Bien qu'elles soient largement exploitées pour la consommation des populations, les connaissances des caractéristiques chimiques et du mode de gisement de ces ressources sont insuffisantes.

La présente étude a pour but d'améliorer la caractérisation hydrogéochimique au moyen des paramètres physico-chimiques de l'eau, des rapports ioniques et des isotopes stables de l'eau dans le bassin versant Sassandra (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Deux campagnes de terrain ont permis de déterminer les paramètres physico-chimiques et prélever 53 échantillons d'eau souterraine dont deux provenant des eaux de surface et un de l'eau de pluie. Les eaux recueillies ont été dosées au laboratoire Analyse chimique et bioanalyse physique du Conservatoire national des arts et métiers de Paris et au laboratoire IDES de l'Université de Paris-Sud (Orsay) respectivement pour les paramètres chimiques et isotopiques. Dans l'ensemble, les eaux étudiées présentent des valeurs de température et de pH acceptables. Elles sont moyennement minéralisées quelle que soit la formation géologique avec une prédominance du Ca^{2+} , du HCO_3^- et du SO_4^{2-} . Aussi, observe-t-on par endroits des teneurs critiques de nitrate montrant l'impact des activités anthropiques sur ces eaux et posant un problème de gestion des ressources en eau de la région. D'ailleurs, leur signature hydrochimique et isotopique a confirmé des infiltrations importantes des eaux météoriques circulant plus ou moins rapidement à travers la fracturation dense du sud-ouest ivoirien [2]. En plus, les isotopes stables de l'eau ont montré que presque toutes les eaux sont soumises à évaporation. Ils ont également permis de différencier les eaux de saison. Celles tout juste renouvelées par les premières pluies, et celles qui résident dans l'aquifère depuis la saison précédente et qui se sont minéralisées pendant toute la saison sèche dans un système fermé.

Références bibliographiques :

- [1] Faillat J.P. et Blavoux B. (1989) : Caractères hydrochimiques des nappes des roches endogènes en zone tropicale humide : l'exemple de la Côte d'Ivoire. *Journal of Africa Earth Sciences*, Vol. 9, n°. 1, pp. 31-40.
- [2] Yao K. T. (2009). *Hydrodynamisme de l'eau souterraine* dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie. Thèse de doct. Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France 284 p.
- [3] Yao K. T., Fouché, O., Oga, M-S., Biémi, J., Pernelle, C. (2010). Circuit de l'eau dans un aquifère de socle hétérogène et fracturé : une enquête hydrochimique dans le bassin versant du Sassandra (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, 5e conférence African Association of Women in Geosciences (CAAWG5) « Femmes et Géosciences pour la Paix », 11-17 Avril 2010, Grand Bassam, Côte d'Ivoire.

P3-11

Vertical evolution of hydrodynamic parameters in weathered and fractured south Indian crystalline-rock aquifers: impact on water geochemistry

A. Boisson^{1,2}, N. Guihéneuf^{1,3}, J. Perrin², O. Bour³, B. Dewandel⁴, M. Alazard¹, S. Ahmed⁵, J.C. Maréchal⁴

1- BRGM, D3E/NRE, Indo-French Centre for Groundwater Research, Uppal Road, Hyderabad 500007, India

2- BRGM, D3E/GDR, 3, Av Claude Guillemin, 45060 Orléans, France

3- OSUR, Géosciences Rennes, UMR6118 CNRS, Université de Rennes 1, 35042 Rennes cedex, France

4- BRGM, D3E/NRE, Rue de Pinville, 34000 Montpellier, France

5- National Geophysical Research Institute, Indo-French Centre for Groundwater Research, Uppal Road, Hyderabad 500606, India

a.boisson@brgm.fr

Due to extensive irrigation, most crystalline aquifers of south India are overexploited. Aquifer structure consists of an upper weathered saprolite followed by a fractured zone whose fracture density decreases with depth. To improve groundwater management, the evolution of hydrodynamic parameters (transmissivity and storage coefficient) with depth needs to be quantified. Falling-head borehole permeameter tests, injection tests, flowmeter profiles, single-packer tests and pumping tests were carried out in the unsaturated saprolite and saturated fractured granite.

Results show that the saprolite is poorly transmissive and that the most conductive part of the aquifer corresponds to the bottom of the saprolite and the upper part of the fractured zone. The transmissivity along the profile is mostly controlled by two distinct conductive zones without apparent vertical hydraulic connection with contrasted electrical conductivity. The transmissivity and storage coefficient both decrease with depth depending on the saturation of the main fracture zones, and boreholes can no longer be exploited after water level has decreased to a given depth. Hydrograph observations are shown to be relevant as a first-order characterization of the media diffusivity evolution with depth and may also allow the localization of the fractures during pumping.

The evolution of these hydrodynamic parameters with depth has a great impact on groundwater prospecting, exploitation and transport properties in such crystalline rock aquifers.

P3-12

Hard rock aquifer groundwater quality in semi-arid context (South India): reactive transport modeling tools

Pettenati Marie^{(1)*}, Picot-Colbeaux Géraldine⁽¹⁾, Thiéry Dominique⁽¹⁾, Boisson Alexandre⁽¹⁾, Alazard Marina⁽²⁾, Perrin Jérôme⁽¹⁾, Dewandel Benoît⁽³⁾, Maréchal Jean-Christophe⁽³⁾, Ahmed Shakeel⁽⁴⁾, Kloppmann Wolfram⁽¹⁾.

(1) BRGM, 3 Av Claude Guillemin, 45060 Orléans, France, (2) BRGM, Indo-French Centre for Groundwater Research, Hyderabad, India, (3) BRGM, 1034 rue de Pinville, 34000 Montpellier, France, (4) CSIR-National-Geophysical Research Institute, Indo-French Centre for Groundwater Research, Hyderabad, India

*Corresponding author: Dr. Marie Pettenati; m.pettenati@brgm.fr

The green revolution in the 1970s, leads to the overexploitation of crystalline aquifer in India and the degradation of groundwater quality, largely used for irrigation. Fluoride (F⁻) is progressively accumulated in the irrigation return flow (IRF) because of strong evaporation (Fig. 1) in the paddy field and mineral dissolution of primary minerals containing F⁻ (fluorapatite, biotite, epidote) [1].

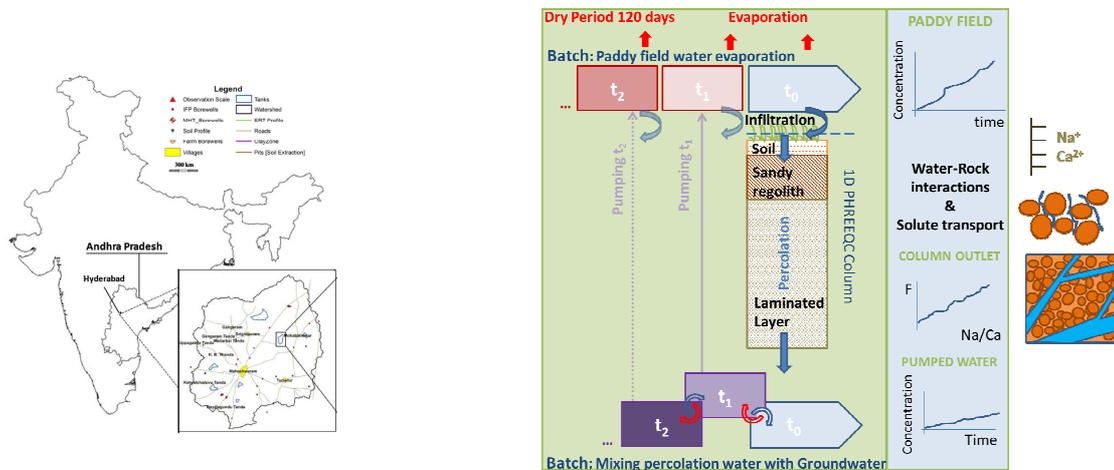


Figure 1 – Location of the Maheshwaram watershed and conceptual reactive transport model.

Through National (ANR MOHINI) and European projects (Saph Pani) with the collaboration of Indian institutions, numerous reactive transport models have been performed in order to assess groundwater quality in such hard rock aquifer in function of land-use and in the context of geogenic contamination:

- A 1D PHREEQC [2] reactive-transport column to conceptualize the infiltration of paddy field IRF under watershed-scale evaporation conditions,
- A conceptual model of regolith-hard-rock aquifers with Managed Aquifer Recharge (MAR) through infiltration tanks and setup of 1D PHREEQC reactive column transport model.

[1]Pettenati et al., 2013 *Appl. Geochem.* 29, 102-116.

[2]Parkhurst and Appelo, 1999 *USGS Water Res. Invest. Rept.* 99-4259, 312 p.

P3-13

Diagraphies chimiques des eaux souterraines : processus d'accumulation du fluor et structure de l'aquifère granitique

Hélène Pauwels⁽¹⁾, Philippe Négrel⁽¹⁾, Benoit Dewandel⁽³⁾, Jérôme Perrin^{(1), (2)},
Cédric Mascré⁽²⁾, Stéphane Roy⁽¹⁾, Shakeel Ahmed⁽⁴⁾

¹ BRGM, Avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 02, France,

² CEFIRES, Indo-French Center for Ground Water Research, NGRI, Uppal Road, 500 007
Hyderabad, India

³ BRGM, 1039 rue de Pinville 34200 Montpellier, France

⁴ NGRI, Uppal Road, 500 007 Hyderabad, India

h.pauwels@brgm.fr

Vingt-trois diagraphies hydrochimiques ont été réalisées pour caractériser la contamination en fluor des eaux souterraines d'un petit bassin versant agricole Indien sur socle granitique qui est soumis à une irrigation intensive pour la culture du riz. Les mesures ont été réalisées avec une sonde Idronaut Ocean Seven 302 équipée pour la détermination des paramètres physico-chimiques (conductivité électrique, température, pH et oxygène dissous) ainsi que d'électrodes sélectives aux fluorures et aux nitrates. Les diagraphies de conductivité ont permis de prendre en compte l'effet de la force ionique sur la réponse des électrodes sélectives. Les concentrations ainsi déterminées présentent une très bonne précision, comme l'atteste la comparaison avec des données acquises en laboratoire, après prélèvement d'échantillons d'eau. Une variabilité significative de la composition chimique des eaux et en particulier de la concentration en F a été observée verticalement dans la majorité des forages. Elle reste toutefois limitée à la couche altérée / fissurée de l'aquifère qui, en général, s'étend jusqu'à 30-35 m de profondeur. Au sein d'un forage, l'ampleur des variations est liée à une forte hétérogénéité des masses d'eau et dépend de la connectivité du réseau de fractures autour du forage. En effet, il s'avère que le taux de variation de la teneur en fluor avec la profondeur est corrélé à la conductivité hydraulique mesurée en forage et/ou au nombre de zones conductrices identifiées dans le forage. La comparaison des profils de nitrates et de fluor permet également de mettre en évidence les zones de connectivité entre forages. Les profils montrent que les teneurs en fluor tendent à croître avec la profondeur, prouvant ainsi le rôle des processus naturels d'interaction eau-roche sur l'accumulation du fluor dans les eaux souterraines. Les concentrations en F observées dans la zone de fluctuation de la nappe suggèrent également des apports ponctuels de fluor par les engrais. Les diagraphies permettent ainsi de mettre en évidence 2 processus qui contribuent à l'accumulation du F dans les eaux souterraines et qui s'ajoutent au rôle, précédemment démontré, de l'évaporation et du return-flow dans les rizières. Il est alors probable que l'approfondissement des forages, lié à l'abaissement du niveau de la nappe par surexploitation de la ressource, ait contribué à accroître la vulnérabilité de la population vis la vis de la fluorose.

P3-14

Approche hydrodynamique des aquifères fissurés en zone de socle par la méthode de la fracture unique et du MPE : cas d'études dans le massif armoricain et conséquence pour la protection de captages

Olivier Gaillard et Thierry Gaillard

Safege Ingénieurs Conseils olivier.gaillard@safege.fr; thierry.gaillard@safege.fr

Les roches dites de socle doivent leurs propriétés aquifères à l'acquisition d'une perméabilité secondaire essentiellement fissurale. Deux modèles hydrodynamiques conceptuels sont classiquement utilisés selon la représentation des fonctions transmissives et capacitives de ce type d'aquifère : le modèle continu (milieu poreux équivalent - MPE) et le modèle discontinu à fracture unique ou réseaux de fractures discrètes. L'objet de cet article est de comparer les résultats obtenus par ces deux approches et de débattre des méthodes de dimensionnement des aires de protection de captage. Les grès du Silurien du site expérimental de Gandouin (Morbihan) ont fait l'objet d'une caractérisation dans le cadre d'une thèse de doctorat en 2001 [1]. Les résultats acquis ont fait l'objet de trois types d'évaluation de l'ouverture de fracture : une évaluation «hydraulique» (par pompage), une ouverture «volumique» (par bilan du volume d'eau de la fracture) et une ouverture «dispersive» (par traçage radial convergent). Globalement, l'ouverture hydraulique semble la plus représentative, car elle apparaît moins sensible aux perturbations du champ d'écoulement causées par la géométrie du réseau de fracturation. L'estimation de l'ouverture par bilan volumique semble être moins judicieuse en raison de sa sensibilité à la géométrie de la zone de pompage. L'ouverture déterminée par traçage donne des résultats très différents des valeurs obtenues par l'ouverture hydraulique, car sa caractérisation dépend de nombreux paramètres dont l'orientation du flux par rapport à l'axe de fracturation [2]. L'approche MPE a elle aussi été utilisée pour évaluer l'échelle à partir de laquelle le recours au MPE était valable. L'étude du site de Gandouin a montré que cette approche n'était pas acceptable sur à l'échelle décimétrique sur la partie ouest du site, plus compartimentée, et qu'elle donnait des résultats comparables aux interprétations de pompage en milieu fissuré (Gringarten, Barker) sur la partie est. Les deux modèles (MPE et Fracture Unique) ont été utilisés plus récemment pour traiter les données de pompages et de traçages de deux autres sites du massif armoricain (Lannilis et Fouesnant, Finistère). Dans chaque cas les vitesses d'écoulement obtenues par les deux méthodes ont été comparées et les résultats d'imagerie de paroi ont été utilisés pour compléter cette analyse. Les deux approches peuvent être considérées comme deux représentations extrêmes du même système réel. La vitesse réelle d'écoulement aurait probablement une valeur intermédiaire entre les valeurs estimées à partir de ces deux modèles. Le modèle de la fracture unique donne à la vitesse d'écoulement une valeur beaucoup plus élevée que le modèle du milieu poreux, ce qui affecte directement l'estimation du temps de parcours de l'eau souterraine. En outre, la surface de contact entre l'eau et le milieu est beaucoup plus faible dans le modèle de la fracture unique, car l'eau n'entre en contact qu'avec les parois de la fracture. Les réactions physico-chimiques eau-roche y sont beaucoup moins importantes, notamment celles qui peuvent atténuer la contamination. Par conséquent, plus un système s'approche du modèle de la fracture unique, plus les efforts doivent être importants pour protéger la qualité de l'eau.

Références bibliographiques :

[1] Gaillard O., 2001 – Caractérisation in situ des réservoirs en roches massives fracturées : écoulement, transport et acidification des eaux. Site expérimental de Gandouin (Morbihan France). *Doctorat de l'Université de Poitiers*.

[2] National Research Council (1996) : Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, Washington, DC: The National Academies Press, 1996.,

P3-15

Use of Heat as a Groundwater Tracer to Characterize the Functioning of Hard-Rock Aquifers at Different Scales

Bour O.¹, Le Borgne T.¹, Klepikova M.V.^{1,2}, Read T.³, Selker J.S.⁴, Bense V.F.³, Le Lay H.¹, Hochreutener R.^{1,4} and N. Lavenant¹

1) Geosciences Rennes, OSUR, UMR CNRS 6118, University of Rennes 1, Rennes, France

2) Engineering Geology, ETH Zürich, Zürich, Switzerland

3) School of Environmental Science University of East-Anglia, Norwich, UK

4) School of Biological and Ecological Engineering, Oregon State University, Oregon, USA

Olivier.Bour@univ-rennes1.fr

Crystalline rocks aquifers are often difficult to characterize since flows are mainly localized in few fractures. In particular, the geometry and the connections of the main flow paths are often poorly constrained with classical hydraulic tests. Here, we show through few examples how heat can be used as a cheap and efficient groundwater tracer to characterize the functioning of hard-rock aquifers at the borehole, inter-borehole and watershed scale. It requires heat advection to be the dominant process of heat transport, but this condition is generally met in fractured rock where flow is highly channelized in few structures. At the borehole scale, groundwater temperature variations with depth can be used to locate permeable fractures and to estimate borehole flows. Measurements can be done with classical multi-parameters probes, but also with recent technologies such as Fiber Optic Distributed Temperature Sensing (FO-DTS) which allows to measure temperature over long distances with an excellent spatial and temporal resolution. In addition, we show how a distributed borehole flowmeter can be achieved using an armored fiber-optic cable and measuring the difference in temperature between a heated and unheated cable that is a function of the fluid velocity. At the inter-borehole scale, temperature changes during cross-borehole hydraulic tests can be easily used to identify the connections and the main flow paths between boreholes.

At the aquifer scale, groundwater temperature may be monitored to record temperature changes and estimate groundwater origin. In the example chosen, the main water supply comes from a depth of at least 300 meters through relatively deep groundwater circulation within a major permeable fault zone. The influence of groundwater extraction is clearly identified through groundwater temperature monitoring. These examples illustrate the advantages and limitations of using heat for fractured rock hydrology.

P3-16

Interests of hydrogeological observatories for testing innovative field methods: insights from the Ploemeur site (Brittany)

Bour O.¹, T. Le Borgne T.¹, L. Longuevergne¹, N. Lavenant¹, J-R de Dreuzy¹, J. Schuite¹, F. Boudin², T. Labasque¹, V. Vergnaud-Ayraud¹, L. Aquilina¹ and Ph. Davy¹

1) Géosciences Rennes, OSUR, UMR CNRS 6118, University of Rennes 1, Rennes, France

2) Géosciences Montpellier, CNRS - Université Montpellier 2, Montpellier Cedex 05, France

Olivier.Bour@univ-rennes1.fr

Hard-rock aquifers are often poorly constrained by the available data and the classical hydrogeological methods. To improve aquifer management and model predictions, there is a strong need to develop new hydrogeophysical methods and to test new environmental tracers to improve the characterization of the functioning of heterogeneous groundwater systems at multiple scales. Here, we present results from the site of Ploemeur (French Brittany) that belongs to the network of hydrogeological sites H+, and where complementarity approaches that involves groundwater monitoring, hydraulic experiments and numerical modelling, have been developed for almost fifteen years. This outstandingly heterogeneous crystalline rock aquifer is used for water supply at a rate of about 10^6 m³ per year since 1991. The geology of the area is complex and involves two main structures: a highly fractured contact zone between the Ploemeur's granite and the overlying micaschists, and a steeply dipping fault striking North 20°. The contact zone in itself consists of alternating deformed granitic sheets and enclaves of micaschists, pegmatite and aplite dykes, and locally mylonites and pegmatite-bearing breccias that are often associated with major borehole inflows. To characterize the hydrological functioning of this complex aquifer, innovative field methods like fiber-optic distributed temperature sensing, radar imagery of tracer test, hydro-geodesy, CFC measurements, have been tested and compared to classical methods (core logging, applied geophysics, flowmeter and pumping tests, hydrochemistry etc...).

The Ploemeur example shows how multiple datasets at different scales may be combined to characterize and model heterogeneous groundwater systems. It also shows the interests of using specific sites as hydrogeological observatories to test novel field methods, to evaluate the relevance of numerical and theoretical models, to monitor groundwater changes and to improve our knowledge on groundwater systems.

P3-17

Mesures gravimétriques et de nivellement pour les aquifères de socle Africains

Ferhat, Gilbert ⁽¹⁾, **Genthon, Pierre** ⁽²⁾, **Mouhouyoudine, Ali Houmadi** ^{(2),(3)},
Hinderer, Jacques ⁽¹⁾, **Hector Basile** ⁽¹⁾, **Yameogo Suzanne** ⁽⁴⁾

(1) EOST-IPGS Strasbourg; (2) HydroSciences Montpellier, (3) Université des Comore, (4)
Université de Ouagadougou.

Gilbert.Ferhat@unistra.fr; Pierre.Genthon@ird.fr

Les mesures gravimétriques ont été récemment considérées comme de peu de valeur pour contraindre les paramètres hydrodynamiques des aquifères sédimentaires au cours d'un pompage d'essai, à cause de la précision de la mesure. Nous proposons ici que cette opinion doive être relativisée pour deux raisons :

- La précision des gravimètres s'améliore en permanence, en particulier actuellement avec l'arrivée des premiers gravimètres supraconducteur transportables.
- Dans le cas d'aquifères comprenant des niveaux argileux, les mesures gravimétriques peuvent et doivent être combinées à des mesures de nivellement, les argiles se déformant au cours des variations de niveau piézométrique.

Nous proposons ici une application possible pour les aquifères de socle d'Afrique de l'Ouest, qui seront fortement sollicités dans les prochaines décennies pour pallier le manque d'eau associé au développement urbain dans cette région. Nous montrons les résultats d'une étude de sensibilité établie pour un pompage d'essai théorique de 7 jours dans un aquifère de socle considéré comme typique de l'Afrique de l'Ouest. Cet aquifère comprend 20 m d'altérites de propriétés supposées connues, surmontant 50 m de milieu fissuré au droit d'une fracture tectonique. La conductivité hydraulique du milieu fissuré est supposée inconnue, compte tenu du peu d'affleurements disponibles. Les mesures consistent en 6 points de gravité et 12 points de nivellement supposés être effectués la dernière journée.

Dans le cas de notre milieu fortement simplifié, et avec la précision actuelle des mesures (2 µgal pour la gravimétrie; 2 mm pour le nivellement), il est possible d'obtenir les valeurs du module d'Young des argiles dans les latérites simultanément avec une bonne estimation de la conductivité hydraulique du milieu fissuré. Une amélioration d'un facteur 10 de la précision des mesures gravimétriques permettrait de tester l'hétérogénéité en perméabilité du milieu fissuré. Comme ces résultats reposent sur de nombreuses hypothèses simplificatrices, une comparaison avec des données de terrain est suggérée.

Références bibliographiques :

- [1] Hinderer et al., 2011. Land water storage from ground and space geodesy; first results from the GHRYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment, Pure Appl. Geophys., doi: 10.1007/s00024-011-0417-9
- [2] Damiata, B.N., Lee, T.C., 2006. Simulated gravitational response to hydraulic testing of unconfined aquifers, J. of Hydrol., 318, 348-359.
- [3] Herckenrath, D., Aucken, E., Christiansen, L., Behroozmand, A.A., Bauer-Gottwein, P., 2012. Coupled hydrogeophysical inversion using time-lapse magnetic resonance sounding and time-lapse gravity data for hydraulic aquifer testing: Will it work in practice? Wat. Res. Res., doi:

P3-18

Characterizing heterogeneities in bedrock aquifers using flow dimension diagnostic sequences

Silvain Rafini⁽¹⁾ et Romain Chesnaux

Centre d'Études sur les Ressources Minérales, Université du Québec à Chicoutimi, 555, boulevard de l'Université, Chicoutimi (Québec), Canada G7H 2B1

¹rsilvini@gmail.com

In hydrogeology, transient hydraulic tests are still commonly interpreted assuming Theis-like conditions, which involves gross approximations of the heterogeneities of natural aquifers, and results in errors in hydraulic parameters estimation which relevance depends on various hydrogeological and practical factors. The oil & gas industry adopted for decades the log-derivative analysis of drawdown for reservoir characterization, as part of the diagnostic plots approach that integrates a panel of analytically-derived interpretative models handling non-purely theissian conditions. Our numerical experiments corroborate how drawdown log-derivative interpretation allows identifying subtle changes in hydrodynamic conditions that are totally invisible on conventional drawdown plots. Such hydrodynamical changes relate to different flow regimes produced by heterogeneities of various types (faults, lateral change in lithological domain, irregular boundary geometry etc.), indicated by changes in the flow dimension as calculated using the GRF model. These changes succeed one another as the front pulse reaches successive heterogeneities while propagating outward from the pump well, resulting in some temporal sequences of flow dimensions. Taking numerical examples, we investigate how lecturing these flow dimension sequences provide unequivocal diagnostic tools for aquifers heterogeneities.

The numerical simulations presented here account for several heterogeneous flow configurations occurring into bedrock aquifers: inclined substratum (thickness-variable), laterally juxtaposed aquifers, faulted aquifers with various fault disposition and attitude. In all cases, numerical analysis reveal that the log-derivative response allows to detect and localize the aquifers heterogeneities by visualizing flow regime changes, with varying flow dimension values. Several original flow regimes are proposed, related to specific sequences of flow dimensions. For instance, it is shown that the presence of a conductive fault into the aquifer very typically generates two successive flow regimes, which lecture allows a confident and unequivocal diagnostic of the presence of the fault. Distinct sequences are generated depending on whether or not the fault is inclined and connected to the well. It is also demonstrated that aquifers of variable thicknesses and aquifers punctually connected to an underlying fractured rock aquifer generate transient responses identical to a recharge barrier on conventional semi-log drawdown plots, leading to erroneous interpretations that may be avoided using the methods suggested in this study.

These examples are pioneer stages of an ongoing construction of a typological catalogue of flow dimension sequences associated with conceptual models of aquifers heterogeneities.

P3-19

Assessing properties of fractured hardrock aquifers from surface deformation monitoring: insight from tiltmeters

Jonathan Schuite (1), Laurent Longuevergne (1), Olivier Bour (1), Nicolas Lavenant (1), Frédérick Boudin (2)

(1) Géosciences Rennes, CNRS - University of Rennes 1, Rennes Cedex, France

(2) Géosciences Montpellier, CNRS - Université Montpellier 2, Montpellier Cedex 05, France

In many geological reservoirs, open fractures or fault zones generally induce high spatial variability of hydrodynamical properties and shape the main deep-seated flow paths. It is of crucial interest to determine their structure and properties in order to achieve a sound and sustained exploitation of resources or to estimate the risk of failure of any underground storage. Tiltmeters have emerged as new tools to observe deformation generated by groundwater flow. As such instruments are highly sensitive to pressure gradients, they are perfectly suited for monitoring channelized flow in connected fractures and fault zones. Hence, they provide a unique insight of these reservoirs' geometry and dynamics over broad

time scales. Here we demonstrate that continuous tilt data from surface long baseline tiltmeters (LBT) can be used alone to evaluate the general functioning of a fractured hardrock system and estimate the geometrical properties of its main conductive features. The study is applied to the pumping site of Ploemeur observatory (Brittany, France) which is well documented and instrumented, and therefore forms a convenient setting for introducing LBT as tools for fractured media hydrology. On the short term, tilt signals are strongly correlated with pumping cycles and associated head level changes in well-connected boreholes. Besides, when pumps are stopped the maximal tilt direction is systematically perpendicular to a subvertical fault zone whose azimuth of strike has thereby been refined down to degree precision. An elastic deformation model of a pressurized buried fracture is then used to evaluate the sensitivity of surface tilt observations to other geometrical parameters (dip, depth, length...). The model is also applied to analyse the link between tilt and transient pressure change within a fracture which then allows for hydromechanical properties estimation from tilt measurements only. Finally, we compare our results with previous estimates obtained from other studies and discuss the orientation of future work that could enhance these estimates.

P3-20

Etude du potentiel en géothermie profonde dans le massif granitique de Moutiers-les-Mauxfaits

Claude Roy (1)

Cécile Le Guern (2)

(1) Conseil Départemental de la Vendée

(2) BRGM

claude.roy@vendee.fr

c.leguern@brgm.fr

Le massif granitique de Moutiers-les-Mauxfaits en Vendée est un batholite déca-kilométrique situé non loin du contact des premiers sédiments jurassiques du Bassin aquitain. Il présente des structures géologiques Nord-Ouest – Sud-Est caractéristiques du Massif armoricain. Ancré au sein d'un contour attribué à son socle métamorphique, le massif comporte de nombreuses sources hydrothermales, uniques pour la région.

Découverte fortuitement dans les années 1960, la source thermo-minérale (22°) émergeant dans le talweg de Moutiers-les-Mauxfaits a fait l'objet de nombreuses investigations géophysiques, géochimiques et hydrogéologiques.

Les études engagées sur le site, puis sur l'ensemble du batholite et son encaissant ont permis de préciser la nature des eaux souterraines portées à une température maximale de 90-100° à la faveur de fractures locales ouvertes tant dans les schistes que dans le granite. La connaissance de la capacité du réservoir situé entre 1 000-1 500 m de profondeur, et l'origine de la salinité et de la température de l'eau, restent néanmoins à affiner.

La communication scientifique précise les différentes étapes d'investigation de la ressource thermo-minérale, les utilisations envisagées du thermalisme à la géothermie profonde, et les perspectives d'approfondissement nécessaires à sa connaissance.

P3-21

Réactions exothermiques dans les profils latéritiques sur granites : conséquences sur les eaux souterraines

**Robert Wyns⁽¹⁾, Laurent Guillou-Frottier⁽¹⁾, J-P. Girard⁽²⁾, Anicet Beauvais⁽³⁾,
Philippe Blanc⁽¹⁾**

(1) BRGM, ISTO, UMR 7327, Orléans ; (2) Total, Pau ;

(3) Aix-Marseille Université, CEREGE (IRD, CNRS), Aix-en-Provence

r.wyns@brgm.fr

L'altération soustractive des roches cristallines met en jeu des réactions d'oxydation et d'hydratation fortement exothermiques au sein des profils latéritiques : l'altération complète d'un mètre cube de granite libère théoriquement plusieurs centaines de mégajoules d'énergie sous forme de chaleur. Lorsque la perméabilité du milieu (arène ou horizon fissuré) est suffisante, la chaleur produite par ces réactions est évacuée vers le haut par convection dans l'eau, et il n'y a pas d'augmentation sensible de la température. Par contre à la base de l'horizon fissuré (« front de percolation » au sens de la théorie de la percolation), la perméabilité est trop faible et limite la convection, et une large partie de l'eau arrivant dans cette zone par des capillaires peu connectés est consommée par les réactions d'hydratation : au voisinage du front de percolation, la chaleur ne peut s'évacuer que par conduction. Dans les roches cristallines la conductivité thermique tend à diminuer lorsque la température augmente. Il y aura donc échauffement de la roche si la puissance thermique ne peut être évacuée en temps réel par conduction. Dans les profils latéritiques sur granites, la présence d'aiguilles d'adulaire (feldspath potassique de basse température) cristallisant dans les clivages des biotites au cours de leur altération est très commune. L'étude des isotopes stables (H et O) des adulaires néoformées et des chlorites provenant de l'altération des biotites sur deux massifs granitiques bretons indique des températures de cristallisation de l'ordre de 100°C. La modélisation du fonctionnement d'un front d'altération sur granite montre qu'à partir d'une puissance thermique d'une dizaine de mW/m³, une température voisine de 100°C peut être atteinte au voisinage du front de percolation au bout de 9 à 10 Ma, permettant la formation de ces minéraux. Ce processus permettrait d'expliquer aussi l'origine des sources « tièdes », comme celles du granite d'Avrillé, pour lesquelles les géothermomètres chimiques et isotopiques [1] indiquent un mélange d'eaux froides et d'eaux ayant été portées au voisinage de 100°C, soit environ 3 km de profondeur pour un gradient géothermique normal, alors que le gradient hydraulique de cette région ne permet pas l'infiltration d'eaux de surface à une telle profondeur.

[1] Le Guern C, Conil P, Négrel P, Sanjuan B, Jouin F, Brach M, Loislard M, Fléhoc C, Béchenec F (2009) Reconnaissance de ressources géothermiques potentielles dans le secteur du massif granitique d'Avrillé (Vendée) – Phase 1 : Géochimie. 955 Rapport BRGM/RP-57000-FR <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57000-FR.pdf>

P3-22

Potentialités aquifères du socle du Hoggar, Algérie

O. Saighi¹ ; A. Filly²

¹ USTHB-FSTGAT, BP 32, El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger osaighi@hotmail.com

² Université de Paris Sud, France

Dans le massif cristallophyllien du Hoggar (sud algérien), les faibles potentialités hydriques sont le plus souvent associées à des terrasses alluviales jalonnant les oueds. Le ruissellement des rares précipitations se fait de façon radiale sur le pourtour du massif et constitue la principale possibilité de recharge de ces petites nappes canalisées par les oueds. Le domaine encaissant, cristallin et cristallophyllien, pourtant intensément fissuré [1], présente des caractéristiques hydrodynamiques médiocres. Les accidents tectoniques qui l'ont affecté ont eu un rôle fondamental sur l'organisation du réseau hydrographique et sur l'hydrogéologie. Ces accidents jouent tantôt un rôle de barrières hydrauliques, quand ils sont silicifiés et indurés, tantôt de drains, quand ils se présentent en gouttières soulignés par les oueds [2]. Du fait du réseau dense de fissures qui les affectent, on peut se demander si, malgré la faiblesse des précipitations (entre 20 à 100 mm/an ; [3]), les formations du socle sont capables d'absorber et de restituer des débits intéressants, et quelle est la part d'eaux récentes ?

Pour essayer d'apporter une réponse hydro chimique à cette question et compléter les connaissances acquises par forages, un échantillonnage de points d'eaux a été réalisé sur le versant sud du massif, le plus proche et le plus exposé aux incursions extrêmes du phénomène de la Mousson ouest-africaine. Des analyses chimiques (ions majeurs), isotopiques (oxygène-18 et deutérium) ainsi que quelques mesures de tritium et de carbone-14, ont été effectuées. Il en ressort que les alluvions d'oueds renferment des eaux qui sont faiblement minéralisées (environ 0.4 g/l), et présentent un contenu isotopique comparable à celui des eaux météoriques. La frange sous-jacente d'altération du socle contient, sur une vingtaine de mètres d'épaisseur, des eaux beaucoup plus minéralisées (en moyenne 1.3 g/l), et des teneurs en isotopes stables plus appauvries [4]. Une activité en carbone 14 et en tritium intermédiaires, attestent d'une composante ancienne des eaux. Quant au socle, les teneurs en oxygène-18 et deutérium s'écartent nettement de celles des eaux des précipitations actuelles. La quasi absence de tritium et d'activité du radiocarbone, militent en faveur d'un héritage ancien, résultant d'une période plus pluvieuse et plus froide que l'actuelle. Ceci témoigne de la prépondérance de la composante ancienne des maigres ressources disponibles dans cette région, qui sont en situation de surexploitation.

References bibliographiques

- [1] Lelubre M., 1952- Recherches sur la géologie de l'Ahaggar central et occidental, (Sahara central). Bull. Serv. Géol. Alger, 2° série No 22.
- [2] Burgeap-Sonarem., 1975- Etude de mise en valeur des eaux souterraines dans le Hoggar, mission d'expertise hydrogéologique dans le Hoggar, Alger.
- [3] Dubief J., 1953- Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. S.E.S., Birmandreis, Alger.
- [4] Saighi O., Mesbah M., 1999- Caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux souterraines de l'Ahaggar et leur relation avec le taux de recharge des nappes. Bulletin du service géologique de l'Algérie. Vol. 10, n° 1.

LISTE DES AUTEURS/ AUTHORS LIST

NOM/NAME	Page	NOM/NAME	Page	NOM/NAME	Page
ABBOT B.	1, 10, 15, 123, 83	BEON O.	70	CLARK ID.	38
ADIHOU C.	77, 100	BERTRAND C.	97	CLOUTIER V.	38
ADLER P.	62	BESSIN P.	49	COLLIN V.	58
AHMED S.	34, 91, 107, 108, 109	BIAOU A.	36	COMTE JC.	84, 89
AKOKPONHOUE N.	87	BLANC P.	117	COUEFFE R.	50
ALAZARD M.	91, 107, 108	BODET L.	78	COULON A.	53
ALLANIC C.	53	BON AF.	98	DALMAIS E.	43
ALLE C.	36, 77	BORNE V.	71, 80	DAVID K.	42
ALLIER D.	73, 105	BOUDIN F.	112, 115	DAVID V.	42
AMBROISE B.	70	BOUICHET G.	62	DAVIES J.	32
AQUILINA L.	40, 83, 85, 90, 112	BOUKARI M.	87, 100	DAVY P.	112
AUDION AS.	61	BOULAY C.	71	DE DREUZY JR.	83, 85, 112
AUGE T.	61	BOUR O.	40, 85, 107, 111, 112, 115	DE MARSILY G.	88
BAILLY L.	61	BOURGINE B.	92	DESCLOITRES M.	35, 77, 87
BAILLY-COMTE V.	50	BROU D.	93	DEWANDEL B.	31, 33, 34, 39, 40, 50, 53, 60, 62, 69, 70, 91, 102, 107, 108, 109
BAIOCCHI A.	37	BURGESS W.	32	DICKSON N.	84
BAISSET M.	69	CABALLERO Y.	53	DRAGONI W.	37
BALTASSAT JM.	70	CAI Z.	89	DUPUY A.	86
BARAN N.	92	CAMERLYNCK C.	40	DUQUE J.	41
BARBET C.	50, 70	CAMPOY A.	87	DURAND S.	40
BARRAT JM.	67	CASSIDY R.	89	DURAND V.	72, 88
BAUER H.	49	CAULFIELD J.	89	EDET A.	51
BAUJARD C.	43	CAZE N.	45	EKPDECK GE.	98
BEAUVAIS A.	61, 117	CELLE-JEANTON H.	86	ESPIRAT JJ.	45
BECHELEN L.	69	CHAMBEL A.	41	EWODO MBOUDOU G.	98
BEN MAAMAR S.	90	CHATENOUX B.	65	FAILLAT JP.	52
BENSE VF.	111	CHESNAUX R.	38, 114	FERHAT G.	113

NOM/NAME	Page	NOM/NAME	Page	NOM/NAME	Page
FILLY A.	118	KOUSSOUBE Y.	36, 84	NEGREL P.	109
FLYNN R.	89	KPEGLI KAR.	65	NITSCHÉ J.	89
FOUCHE O.	106	LABASQUE T.	40, 83, 112	NORIE A.	70
FRESLON M.	55	LACHASSAGNE P.	31, 33, 39, 50, 70, 88	OFTERDINGER U.	84, 89
FRISSANT N.	53	LADOUCHE B.	50, 53, 60, 62	OGA MS.	106
GABION D.	92, 99	LANINI S.	50	OKEREKE CS.	51
GAILLARD O.	110	LAURENT A.	55	OKULLO J.	101
GAILLARD T.	110	LAVALADE JL.	54	OMBOLO A.	98
GANDOLFI JM.	57, 69	LAVENANT N.	40, 111, 112, 115	OUEDRAOGO M.	72
GELE O.	58	LAWSON F.M.AM.	35, 77, 101	OUTOMBE E.	36
GENEVIER M.	53	LE BORGNE T.	40, 111, 112	OWOR M.	101
GENTER A.	43	LE COUSTOMER P.	86	PASQUET S.	78
GENTHON P.	62, 113	LE GAL A.	94, 102	PAUWELS H.	40, 90, 109
GIRARD J.P.	117	LE GUERN C.	116	PELTIER J.	45
GOURCY L.	92	LE LAY H.	111	PERRIN J.	91, 107, 108, 109
GRATALOUP S.	50	LEBON D.	45	PESEL M.	72
GUERIN R.	36, 78	LEGUERE J.	45	PETTENATI M.	91, 108
GUEUTIN P.	85	LEONARDI V.	88	PIACENTINI M.S.	37
GUIHENEUF N.	107	LERAY S.	40, 85	PICOT-COLBEAUX G.	91, 108
GUILLOCHEAU F.	49	LONGUEVERGNE L.	40, 112, 115	PILATOVA K.	89
GUILLOU- FROTTIER L.	61, 117	LOPEZ B.	92	PINAY G.	83
GUTIERREZ A.	54, 67, 69, 92	LOTTI F.	37	PINSON S.	105
HECTOR B.	113	LUCASSOU F.	99, 102, 103	PISCOPO V.	37
HERBRETEAU F.	94	MACE E.	68	PLAGNES V.	93
HINDERER J.	113	MARCAIS J.	85	RAFINI S.	114
HMAE Y.	45	MARDHEL V.	54, 105	READ T.	111
HOCHREUTENER R.	40, 111	MARECHAL JC.	34, 40, 46, 50, 60, 62, 70, 91, 107, 108	RICAUD A.	80
HUNEAU F.	86	MARJOLET G.	94	ROBERT A.	44
JAUNAT J.	86	MARLIN C.	72	ROBIN C.	49
JEANPERT J.	60, 62	MASCRE C.	109	ROBINS N.	32
JOIN JL.	60, 62	MATHIEU F.	69, 70	ROQUES C.	40
KAMAL ZF.	39	MAURIZOT P.	62	ROULEAU A.	38
KLEPIKOVA MV.	111	MONDAIN PH.		ROY C.	116
KLOPPMANN W.	91, 108	MONOD B.	57	ROY S.	109
KOITA M.	36, 101	MOREAU CF.	58	RUIZ L.	83
KOLBE T.	83	MOUGIN B.	40, 66, 73, 99, 103, 104	SAIGHI O.	118
KONAN- WAIDHET AB.	79	MOUHOUYUDDINE AH.	113	SAPLAIROLES M.	57
KOTCHONI V.	100	MUDRY J.	97	SAVANE I.	72
KOUADIO KE.	79	NDAM NGOUPAYOU JR.	98	SCHMITTBUHL J.	43

NOM/NAME	Page
SCHROETTER JM	40, 49
SCHUITE J.	112, 115
SEGUIN JJ.	73
SEGUIS L.	87
SELKER JS.	111
SEVIN B.	62
SHARP J.	21
SORO D.	36
STOLLSTEINER P.	105
SURDYK N.	92
THIERY D.	108
THOMAS Z.	83
TIMMS W.	42
TINDIMUGAYA C.	101
TOSSA AYA.	65
TROEGER U.	21
VALLET A.	97
VANDENBEUSCH M.	45
VAUTIER C.	83
VERGNAUD- AYRAUD V.	40, 83, 85, 112
VIDAL J.	43
VOUILLAMOZ JM.	35, 36, 65, 77, 84, 87, 100, 101
WALTER J.	38
WILSON C.	89
WUILLEUMIER A.	105
WYNS R.	31, 33, 50, 53, 56, 57, 59, 61, 70, 117
YACOUBA H.	36
YALO N.	35, 77, 101
YAMEOGO S.	113
YAO THK.	106
ZAIDI F.K.	39