

PROJET DE THESE pour l'ANNEE 2018-2019

IMPORTANT : Les étudiants titulaires de Master ou équivalent doivent envoyer leur dossier complet au porteur du projet de thèse et au laboratoire indiqué, et pas à l'Ecole Doctorale

Date limite de dépôt par le laboratoire du dossier du candidat sélectionné, à l'Ecole Doctorale :
le vendredi 22 juin 2018, 13h heure de Guyane.

Discipline et Mention du Doctorat	Géosciences
Domaine scientifique principal	Hydrogéologie
Domaines scientifiques secondaires	Géochimie, géologie, hydrodynamique, modélisation
Unités de rattachement Unités adossés à l'ED : UMR EcoFoG, UMR Espace-Dev, UMR QualiSud, UMSR LEEISA, EA EPaT, EA MINEA, IPG)	BRGM et Université de Guyane
Autre Unité de rattachement de l'Université de Guyane (UG) ou convention en cours.	Convention partenariale BRGM Campus-UG du 05/12/2017
Projet Structurant autour des thèmes de l'ED 587	Dynamique et gestion durable des territoires amazoniens Dynamique des écosystèmes spontanée ou influencée par l'action de l'Homme (interactions Hommes-milieux)
Direction de la thèse	Philippe Négrel (HdR), BRGM – p.negrel@brgm.fr 02 38 64 39 69 Arnauld Heuret (UG) – arnauld.heuret@univ-guyane.fr 05 94 29 99 50
Collaborations extérieures éventuelles envisagées (convention de codirection, - de cotutelle ; entreprise...)	Communauté d'agglomération du centre littoral, IRD
Connaissances et compétences requises chez l'étudiant	Sciences de la terre, hydrogéologie, hydrogéochimie
Titre de la thèse	<i>Hydrogéologie des aquifères fracturés en milieu intertropical : Caractérisation de leur fonctionnement par approche hydrodynamique et géochimique</i>
Résumé 1 (5-8 lignes, police Arial 10) : Présentation explicite du projet de thèse – Aspects scientifiques	Les attendus de la thèse concernent i) le rôle de la pétrostructure et des discontinuités géologiques sur la perméabilité et le comportement hydrodynamique des

Finalité, méthodologie et problématique, intérêt scientifique, caractère innovant	aquifères métamorphiques, ii) le contrôle de ces structures sur les processus d'altération, iii) l'origine des eaux alimentant ces aquifères et les interactions eau-roche et iv) intégrer la pétrologie, les discontinuités, la structure des profils d'altération, pour contraindre les processus de recharge.
Résumé 2 (5-8 lignes, police Arial 10) : Présentation des enjeux de la thèse Adéquation avec la politique scientifique de l'Établissement - Intérêt de cette thèse dans le cadre du développement régional	Les aquifères de socle constituent une ressource en eau de plus en plus convoitée en Guyane. Une meilleure connaissance de ces processus permettra de mieux évaluer la durabilité de la ressource en cas d'exploitation de ces aquifères, voire de mieux en apprécier leur vulnérabilité face à d'éventuels impacts anthropiques. Les améliorations des connaissances de ces aquifères en milieu métamorphique répondront aux attentes des politiques publiques responsables de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau actuelle et future.

Explication du Projet de thèse

1°) Présentation des aspects scientifiques du projet de thèse et état de l'art

Finalité, méthodologie et problématique, intérêt scientifique, caractère innovant

A l'échelle mondiale, les aquifères de socle constituent une ressource en eau de plus en plus convoitée. Cependant, très peu d'études ont été menées sur les mécanismes de recharge de ces aquifères, ni sur le rôle joué par le profil d'altération et des discontinuités géologiques (filons, failles, etc.). Une meilleure connaissance de ces processus permettra de mieux évaluer la durabilité de la ressource en cas d'exploitation de ces aquifères, voire de mieux en apprécier leur vulnérabilité face à d'éventuels impacts anthropiques.

Si pour les aquifères de roche ignée (granitoïdes), les concepts relatifs à leur mise en place et à leur fonctionnement hydrogéologique sont de mieux en mieux connus, les travaux sur les aquifères de roches métamorphiques restent encore très anecdotiques. D'où l'intérêt de combler les lacunes pour ces milieux apparemment plus complexes en examinant ceux du socle guyanais qui font l'objet d'une demande croissante de la part des politiques publiques locales pour AEP des populations et transférer les connaissances acquises vers d'autres zones d'intérêt.

De nombreuses études menées par le BRGM (e.g. Wyns, 1999 ; Lachassage et al., 2011 ; Maréchal et al., 2003 ; Dewandel et al., 2006) ont mis en évidence les propriétés hydrogéologiques singulières des aquifères de socle en milieu granitique ou apparenté. L'influence de la pétro-structure de la roche mère sur la texture et le développement des horizons d'altération a été montrée par Beauvais et Colin (1993) et Nahon (1986). Sur les milieux granitiques en particulier,

Nombre d'auteurs (e.g. Dewandel et al., 2006 ; 2011, 2017a ; Durand et al., 2017) ont identifié les propriétés hydrogéologiques de l'horizon d'altération (peu perméable, fortement capacitif) et de l'horizon fissuré (fortement transmissif, peu capacitif). A l'échelle de sites de pompage, plusieurs travaux, mettant en œuvre des méthodes d'interprétation spécifiques d'essais de pompage et des données hydrogéochimiques (Dewandel et al., 2014, 2017b) ont permis d'identifier l'influence d'accidents tectoniques majeurs sur le comportement hydraulique de l'horizon fissuré.

En raison de la complexité de ces aquifères, les processus de recharge sont peu connus. Pour s'exempter de cet écueil, beaucoup d'études utilisent des méthodes de variation piézométrique et de bilan pour estimer la recharge de ces aquifères. Ces méthodes font cependant l'hypothèse d'un milieu homogène équivalent sans que l'on ait d'information sur la variation spatiale de ces processus (e.g. Rohde et Bockgard, 2006, 2015 ; Healy et Cook, 2002 ; Scanlon et al., 2002 ; Maréchal et al., 2006, Dewandel et al., 2010).

Pour autant, des travaux récents (Cai et Offerdinger, 2016) suggèrent que la recharge saisonnière de ce type d'aquifère est contrôlée par les horizons d'altération, et l'intensité des précipitations (faible) contrôlerait essentiellement la recharge directe. De plus, il a été observé (Rhode et Bockgard, 2006) qu'une recharge rapide et localisée pouvait exister le long de cours d'eau ou de zones de failles. Il y a donc un manque de déterminisme sur la compréhension de ces processus de recharge.

En domaine de socle un nombre limité d'études se sont intéressées au signal de la recharge de ces aquifères (Négre et al., 2011). Or il s'est avéré dans bon nombre d'étude hydrogéologique que, la caractérisation géochimique des eaux peut apporter des précisions sur l'origine (Négre et al., 1998, 2007, 2010, 2011 etc.), le temps de résidence (Jaunat, 2012) et la circulation d'eau dans ces systèmes (Jaunat, 2012), d'où la nécessité de mener conjointement des investigations

hydrogéologiques et géochimiques pour comprendre les processus de recharge dans les aquifères de socle.

En conclusion, une caractérisation fine du comportement hydrogéologique et géochimique (chimie et isotopes) des nappes en réponse à des pluies identifiées devraient mettre en évidence des mécanismes de transfert de matière au sein de ces réservoirs.

2°) **Présentation des objectifs et enjeux de la thèse**

Adéquation avec la politique scientifique de l'UG - Intérêt de la recherche dans le cadre du développement régional.

Cette thèse amènera de nouvelles connaissances et le développement et la mise en œuvre d'outils intégrés permettra de préciser i) les relations entre structure géologique et écoulements souterrains ainsi que ii) l'origine de l'eau et les transferts d'eau (parcours de l'eau) responsable de l'alimentation de ces aquifères.

A l'échelle de la Guyane, ces travaux préciseront l'origine des structures perméables, notamment au sein des unités métamorphiques, ce qui permettra de mieux localiser la ressource et améliorera les méthodes d'implantation de forages par rapport aux connaissances actuelles (Négre et Petelet-Giraud, 2010 ; Chetelat et al., 2005 ; Négre et al., 1997 ; Négre et Lachassagne, 2000).

D'autre part, la compréhension de leurs modalités de recharge, outre la durabilité et le renouvellement de la ressource, aidera à mieux appréhender leur vulnérabilité vis-à-vis d'éventuelles pollutions. De ce fait, ces améliorations de connaissances répondent aux attentes des politiques publiques responsables de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau actuelle et future notamment en Guyane où les investigations de terrain de ce travail de thèse seront réalisées.

Parallèlement à l'étude hydrogéologique et hydrodynamique approfondie qui aidera à mieux caractériser les propriétés des réservoirs. La thèse se propose d'étudier par approche multi-isotopique les interactions entre composantes du cycle de l'eau afin d'améliorer la compréhension des mécanismes de recharge des aquifères de socle en contexte amazonien.

Cette étude s'appuiera également sur l'analyse structurale des profils d'altération rencontrés et permettra de préciser les schémas conceptuels des écoulements.

Ces approches complémentaires seront mises en application en Guyane sur plusieurs sites d'études appartenant à la ceinture de roches vertes. Elles conduiront à quantifier l'apport des pluies contribuant à la recharge et tentera d'identifier les mécanismes contribuant à leur transfert en profondeur.

Le travail de thèse s'organisera suivant deux échelles d'investigation, l'une à petite échelle, et l'autre à grande échelle.

Afin de préciser à *petite échelle* le comportement hydrodynamique et géochimique à petite échelle, une partie du travail sera réalisé sur 2-3 sites de forage non-exploités. Ils seront identifiés en fonction de leur contexte géologique et structural et de leur niveau de connaissance. Pour cela la base de données du BRGM en Guyane sera mise à contribution pour identifier les sites.

Une campagne de prélèvement d'eau destinée à l'analyse géochimique (ions majeurs, mineurs et éléments traces) et isotopique (Deutérium, Oxygène 18 et Strontium 87/86) sera réalisée tous les mois pendant 1 à 2 ans sur les points de surveillance (Sources, piézomètres et forage principal) sélectionnés sur chaque site. Sur quelques campagnes, des prélèvements multi-niveaux pourront être envisagés. La partie analytique sera assurée par le thésard au sein du laboratoire de chimie isotopique du BRGM à Orléans.

Plusieurs essais de pompage seront réalisés sur chaque site, au cours desquels des échantillons d'eau seront prélevés afin de suivre l'évolution de la composition de l'eau (ions majeurs, mineurs et éléments traces, Deutérium, Oxygène 18 et Strontium 87/86). Ces données seront mises au regard des données structurales afin d'une part de mettre en évidence des liens entre propriétés hydrogéologiques et information géologique, et d'autre part elles serviront à affiner les résultats des modélisations hydrodynamiques (limites, directions préférentielles d'écoulement, drains, drainance, etc.) et hydrogéochimiques (modèle piston, exponentiel, etc.).

Un suivi continu sera assuré par des sondes automatiques permettant de mesurer les paramètres physico-chimiques de l'eau (niveau, conductivité, température) de manière à avoir une idée du fonctionnement de l'aquifère, en regard de la recharge et du transport.

A *grande échelle* et concomitamment à ces expérimentations, d'autres sites d'études, à l'échelle du bouclier des Guyanes et issus de la base de données du BRGM, feront l'objet d'un suivi géochimique (ions majeurs, mineurs et éléments traces, Deutérium, Oxygène 18 et Strontium 87/86) saisonnier ce qui permettra d'une part de compléter de jeu données existantes (chroniques piézométriques et essais de pompage réinterprétés), et d'autre part permettra de juger de la transposable des résultats obtenus sur les sites à petite échelle. Ces sites seront choisis en fonction de leurs contextes géologiques et structuraux afin de juger de la représentativité des processus identifiés à partir des sites pilotes susmentionnés. Ces sites à grande échelle seront choisis sur l'ensemble du bouclier des Guyanes parmi les forages en exploitation. L'ensemble de ces données fera l'objet d'un traitement statistique ce qui permettra de caractériser et de mieux comprendre les conditions de recharge des

différents sites à l'échelle du bouclier et, in fine, de mieux modéliser la relation entre pluies et niveaux piézométriques.

Références bibliographiques :

- Beauvais, A., Colin, F. 1993. Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. *Chem. Geol.*, 106, 77-101.
- Cai, Z., Ofterdinger, U. 2016. Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured rock aquifers, NW Ireland. *Hydrogeology Journal*, 535, 71-84.
- Chetelat, B., Gaillardet, J., Freydisier, R., Négrel, Ph. 2005. Boron isotopic composition in french Guiana precipitations: sources, identification and contribution of cyclic boron to river budget. *Earth and Planetary Science Letters*, 235, 16-30.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.-C., Krishnamurthy, N.-S. 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering, *Journal of Hydrology*, 330, 1-2, 260-284.
- Dewandel, B., Alazard, M., Lachassagne, P., Bailly-Comte, V., Couéffé, R., Grataloup, S., Ladouche, B., Lanini, S., Maréchal, J.-C., Wyns, R. 2017. Respective roles of the weathering profile and the tectonic fractures in the structure and functioning of crystalline thermo-mineral carbo-gaseous aquifers, *Journal of Hydrology*, 547, 690-707.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Zaidi, F.-K., Chandra, S. 2011. A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India. *Journal of Hydrology*, 405, 474-487.
- Dewandel, B., J.-C. Maréchal, O. Bour, B. Ladouche, Ahmed S., Chandra, S., Pauwels, H. 2012. Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and efficient porosity at watershed scale in crystalline aquifers. *Journal of Hydrology*, 416-471, 83-97.
- Dewandel, B., Jeanpert, J., Ladouche, B., Join J.-L., Maréchal, J.-C. 2017a. Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map. *Journal of Hydrology*, 550, 118-129.
- Dewandel, B., Caballero, Y., Perrin, J., Boisson, A., Dazin, F., Ferrant, S., Chandra, S., Maréchal, J.-C. 2017b. A methodology for regionalizing 3-D effective porosity at watershed scale in crystalline aquifers. *Hydrological Processes*, 31(12), 2277-2295.
- Dewandel, B., Perrin, J., Ahmed, S., Aulong, S., Hrkal, Z., Lachassagne, P., Samad, M. and S. Massuel. 2010. Development of a Decision Support Tool for managing groundwater resources in semi-arid hard rock regions under variable water demand and climatic conditions. *Hydrological Processes*, 24, 27884-2797.
- Durand, V., Leonardi, V., de Marsily, G., Lachassagne, P. 2017. Quantification of the specific yield in a two-layer hard-rock aquifer model. *Journal of Hydrology*, 551, 328-339.
- Healy, R.W., Cook, P.G. 2002. Using Ground Water Levels to Estimate Recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109.
- Jaunat, J. 2012. Caractérisation des écoulements souterrains en milieu fissuré par approche couplée hydrologie-géochimie-hydrodynamisme Application au massif de l'Ursuya (Pays Basque, France). *Sciences de la Terre. Université Michel de Montaigne - Bordeaux III, Français.*
- 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, 145-160.
- 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*, 33, 451-460.
- Maréchal, J.-C. Dewandel, B., Ahmed, S., Galeazzi, L., Zaidi, F.K. 2006. Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture. *Journal of hydrology*, 329, 281-293.
- Nahon D.-B. 1986. Evolution of iron crusts in tropical landscapes; In: Rates of chemical weathering of rocks and minerals (eds) Colman S.M. and Dethier D.P., 169-191.
- Négrel, Ph., Petelet-Giraud, E. 2010. Geochemistry, isotopic composition ($\delta^{18}O$, δ^2H , $87Sr/86Sr$, $143Nd/144Nd$) in the groundwater of French Guiana as indicators of their origin, interrelations. *CR Geosciences*, 786-795.
- Négrel, Ph., Lachassagne, P., Laporte, P. 1997. Caractérisation chimique et isotopique des pluies de Cayenne (Guyane Française). *C.R. Académie des Sciences*, 324, 379-386.
- Négrel, Ph., Lachassagne, P. 2000. Geochemistry of the Maroni River (French Guyana) during low water stage: Implications for water rock interaction and groundwater characteristics. *Journal of Hydrology*, 237, 212-233.
- Négrel, Ph., Millot, R., Roy S., Guerrot, C., Pauwels, H. 2010. Lead isotope in groundwater as indicator of water-rock interaction (Masheshwaram catchment, Andra Pradesh, India). *Chemical Geology*, 274, 136-148.
- Négrel Ph., Pauwels, H., Dewandel, B., Gandolfi, J.M., Mascre, C., Ahmed, S. 2011. Understanding groundwater systems and their functioning through the study of stable water isotopes in a hard-rock aquifer (Maheshwaram watershed, India). *Journal of hydrology*, 397, 55-70.
- Négrel, Ph., Lemièrre, B., Machard de Grammont, H., Billaud, P., Sengupta, B. 2007. Hydrogeochemical processes, mixing and isotope tracing in hard rock aquifers and surface waters from the Subarnarekha River Basin, (east Singhbhum District, Jharkhand State, India). *Hydrogeology Journal*, 15, 1535-1552
- Négrel, Ph., Roy, S., 1998. Chemistry of rainwater in the Massif Central (France): a strontium isotope and major element study, *Applied Geochemistry*, 13, 941-952.
- Rohde, A., Bockgard, N. 2006. Groundwater recharge in a hard rock aquifer: A conceptual model including surface-loading effects. *Journal of Hydrology*, 330, 389-40.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18-39.
- Wyns R., Gourry, J.-C., Baltassat, J.-M., Lebert, F. 1999. Caractérisation multiparamètre des horizons de subsurface (0-100 m) en contexte de socle altéré. Colloque GEOFCAN: Géophysique des sols et des formations superficielles. BRGM, INRA, IRD, UPMC, 21-22 septembre, Orléans, France, Actes du 2e colloque, 105- 110.

Les étudiants candidats au sujet de thèse proposé doivent fournir aux porteurs du sujet et leur directeur de laboratoire les pièces suivantes :

Pièces à joindre au dossier :

- Copie d'une pièce d'identité
- Copie du diplôme Master (DEA ou équivalent)
- Copies des relevés de notes licence (L3) et master (M1 et M2)
- Une lettre de motivation du candidat
- CV complet
- Justificatif activité professionnelle si salarié(e)

 **LES DOSSIERS INCOMPLETS SERONT REFUSÉS**