

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)

Donissongou Dimitri Soro^(1,2), Mahamadou Koïta⁽¹⁾, Angelbert Biauou⁽¹⁾, Eli Outombé⁽¹⁾, Youssouf Koussoubé⁽³⁾, Christian Alle⁽⁴⁾, Hamma Yacouba⁽¹⁾, Roger Guérin⁽²⁾, Jean-Michel Vouillamoz⁽⁵⁾

(1) Fondation 2iE, 01 BP 594 Ouagadougou, Burkina Faso, dimitri.soro@2ie-edu.org

(2) Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, France

(3) Université de Ouagadougou, Burkina Faso

(4) Université d'Abomey-Calavi, Bénin

(5) IRD/UJF-Grenoble 1/CNRS/G-INP-UMR LTHE

I. INTRODUCTION

Selon des études menées sur l'occurrence des eaux souterraines en zones de socle (Sander, 2007 ; Matthys et al., 2009), une bonne connaissance de la géologie locale, incluant la lithologie, la tectonique, les mécanismes de recharge et l'emmagasinement des aquifères est indubitablement important pour la recherche de cibles hydrogéologiquement favorables pour l'implantation de forage. A cela, il faut ajouter la géomorphologie et le climat. Mais, le manque de données disponibles, leurs inconsistances avec les processus conceptuels potentiels n'a pas permis dans de nombreux cas la promotion des modèles conceptuels hydrogéologiques en zones de socle. Toutefois, sous divers conditions morphoclimatiques, des avancées notables ont été constatées récemment en Bretagne (Wyns et al., 2004), en Inde (Dewandel et al., 2006) et en Côte d'Ivoire (Koïta et Jourde, 2011) sur la conceptualisation hydrogéologique des zones de socle (Lachassagne et al., 2011). Sous climat sahélien, même si des études (Leprun et Nahon, 1973 ; Roose, 1978) se sont intéressées aux processus de cuirassement au niveau du profil d'altération des formations de socle, très peu d'études, à notre connaissance se sont focalisées sur la description des profils d'altération dans ce type de contexte climatique. Ce constat sous-tendrait-il que : le profil d'altération proposé sur une formation donnée est généralisable à toutes les formations géologiques ayant subi les mêmes événements tectomorphologiques quel que soit le contexte climatique ? C'est pour apporter des éléments de réponses à ce questionnement scientifique que cette étude est ainsi initiée. Elle vise dans un premier temps à proposer un modèle conceptuel de profil d'altération sous climat sahélien et dans un second temps à mettre en évidence les similitudes et les divergences éventuelles pouvant exister entre les modèles de profil d'altération proposé par cette étude et le modèle proposé sous climat tropical humide sur des formations ayant subi les mêmes grands événements tectonomorphologiques. Pour cela, le site expérimental de Sanon au Burkina Faso est choisi comme cas d'étude.

II. DESCRIPTION DU SITE EXPERIMENTAL DE SANON

Le site expérimental de Sanon est situé à environ 40 km au nord-ouest de Ouagadougou (capitale du Burkina Faso). Il est localisé dans une entité hydrologique (sous-bassin versant du Nazinon ou Volta Rouge) d'environ une dizaine de kilomètres carrés et est caractérisé par un relief très peu contrasté (Fig.1). Des cuirasses latéritiques culminant entre 350 et 370 m constituent les limites de cette entité hydrologique. La partie centrale du site est caractérisée par une large vallée à fond relativement plat de pente orientée de l'Est vers l'Ouest.

Le climat de la zone est de type sahélien marqué par une courte saison de pluie (Juin-Septembre) et une longue saison sèche (Octobre-Mai). La pluviométrie annuelle varie entre 700 et 900 mm en moyenne tandis que les températures oscillent entre 25 et 40°C.

Sur le plan géologique, le site est situé en zone de socle caractérisé par un patchwork de migmatite, gneiss et granite dans la plaine centrale avec un recouvrement sableux, arenitique ou latéritique et de roche verte au niveau des buttes cuirassées. La rareté des affleurements ne militent pas en faveur d'une cartographie précise des domaines occupés par ces formations. La synthèse de l'histoire géologique faite par Hottin et Ouédraogo (1975) montre que la mise en place de ces formations est attribuée à la phase tectonovolcanique Eburnéenne (vers 2200 millions d'années) qui a affecté les formations du Protérozoïque inférieur dans plusieurs pays de l'Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Ghana, Niger, etc.). La mise en place des granites et des migmatites commencent vers 2100 Ma où les matériaux déjà métamorphisés d'âge Antébirimien sont affectés par une migmatitisation responsable des granites « gris » et des migmatites. Entre 2000 et 1800 Ma, l'épimétamorphisme général du Birimien survient, suivi de la mise en place des granites leucocrates. Cette granitisation entraîne la recristallisation sillicopotassique des granites « gris » et des migmatites. Quant aux roches vertes, structures complexes composées de metabasites, elles ont été mises en place à la fin du Birimien caractérisée par des séries métamorphisées et plissées en discordance avec les formations voisines. Les directions principales de fracturations sont : N15° à N20° E et N100° à N120° E.

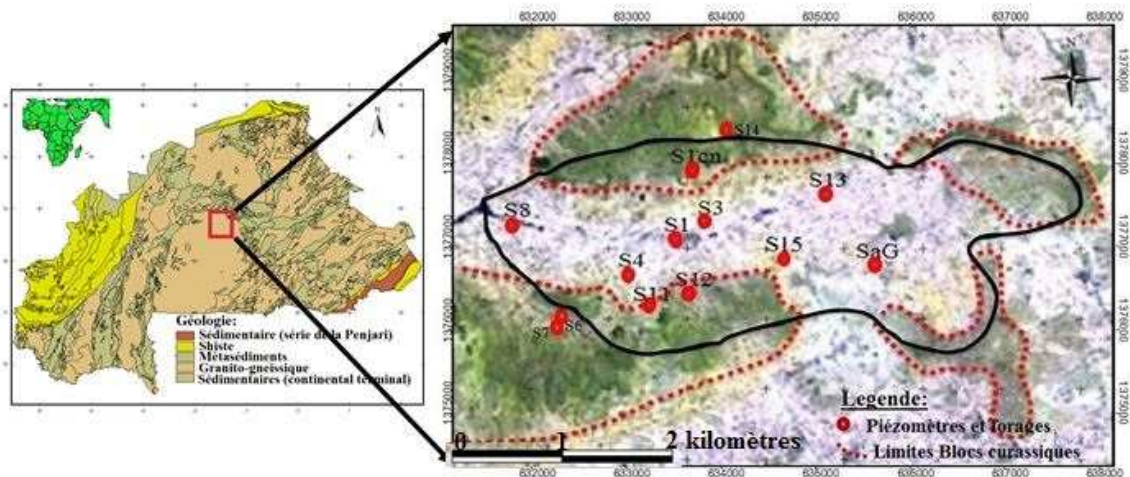


Figure 1 : Localisation du site expérimental de Sanon

III. METHODES

L'approche méthodologique adoptée a consisté d'une part à décrire à l'échelle du forage le profil d'altération, et d'autre part à décrire le profil d'altération (profil en long) de crête en crête.

III. 1 Description du profil d'altération à l'échelle du forage

Compte tenu de la rareté de l'affleurement du substratum et du profil d'altération sur le site de Sanon, la description de la structuration verticale du profil d'altération est faite à partir de l'interprétation de 18 lithologs issus de forages réalisés au cours de cette étude et des travaux antérieurs (BRGM-Aquater, 1991). L'interprétation des lithologs a pu être enrichie par certaines données de foration (vitesse d'avancement, changement d'outil de foration lors du fonçage, analyse des cuttings) et par l'observation de bancotières (fosses réalisées pour la fabrication de brique de latérite) au niveau des versants cuirassés.

III. 2 Description du profil d'altération de crête en crête

La description du profil en long de l'altération de crête en crête dans le bassin de Sanon est faite à partir de la tomographie électrique des résistivités, encore appelée *Electrical Resistivity Tomography (ERT)*. Elle

permet d'obtenir un modèle de la résistivité 2D du sous-sol où la répartition de la résistivité varie verticalement et horizontalement le long du profil (Dahlin, 2001). La mise en œuvre de cette technique se subdivise en trois étapes à savoir :

- **Modélisation synthétique**

Cette étape précède la phase de terrain. Le modèle synthétique permet de choisir le dispositif à utiliser et les bons paramètres d'inversion car le choix du meilleur dispositif dépend de la structure à imager, du bruit de fond et de la sensibilité de l'appareil de mesure. Cette démarche se résume dans l'organigramme ci-dessous (Fig.2). Les lithologs issus des forages S1, S15, SaG ont permis de définir la structure à imager mais en se limitant seulement à la géométrie. Le logiciel DC2DInvRes (Günther, 2004) a été choisi pour la modélisation synthétique.

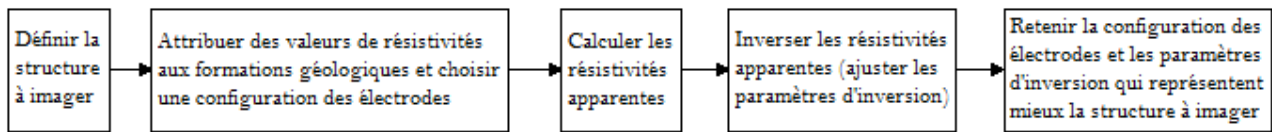


Figure 2 : Processus simplifié de la modélisation synthétique

Les configurations d'électrodes retenues pour les investigations de terrain sont le Wenner alpha et beta (Dahlin and Zhou, 2004) mises en œuvre avec 72 électrodes espacées de 5 mètres.

- **Investigations de terrain**

Les mesures de terrain ont été réalisées avec le résistivimètre Syscal R1 Swith72 de la société Iris Instruments. Trois sections PS1, PS15 et PSaG passant par les forages S1, S15 et SaG et liant les crêtes (buttes cuirassées) Nord et Sud, de 2800, 2400 et 1900 m de longueur respective sont réalisés (Fig. 3). Les directions des profils sont N15° E (PS1) et N08° E (PS15 et PsaG) en raison des obstacles (habitations, lieux sacrés) observés sur le terrain et aussi dans un souci de recouper le maximum des structures linéamentaires proposés par les travaux antérieurs (Kabré, 2012 ; BRGM-Aquater, 1991). Ceci permettra de valider les linéaments qui seraient la représentation surfaciques des fractures du substratum qui n'ont pas pu être apprécié en termes d'extension et d'orientation lors des investigations à l'échelle du forage. L'intérêt de faire passer les profils à proximité de ces forages réside dans le fait que les lithologs issus de ces forages serviront de référence pour apprécier la réalité géologique des modèles de profils d'altération issus de l'inversion des résistivités apparentes et ainsi d'aider à la validation des modèles géologiques obtenus.

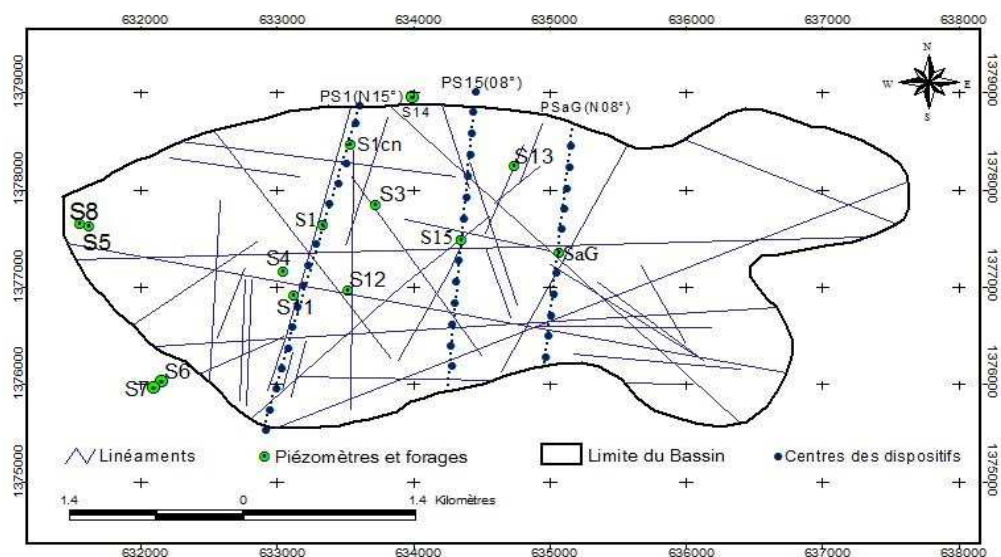


Figure 3 : Localisation des profils ERT par rapport aux linéaments et aux forages

- **Traitement des données : inversion, calibration et classification**

Le traitement des données comprend la phase d'inversion des données, de calibration et de classification. L'inversion des données consiste à obtenir à partir des résistivités apparentes mesurées sur le terrain les résistivités interprétées de façon itérative. La routine d'inversion utilisée est basée sur le lissage contraint par la méthode des moindres carrés (Günther, 2004). La fonction objective ci-dessous (1) contraint l'inversion de telle manière que les variations spatiales des résistivités calculées soient lissées

$$f = (\rho_{cal} - \rho_{mes})^2 + \lambda \left(\frac{d\rho}{dx} + z \frac{d\rho}{dy} \right) \quad (1) \quad \text{avec } \rho_{cal} : \text{résistivité calculée, } \rho_{mes} : \text{résistivité mesurée ;}$$

ρ : résistivité du modèle de référence

Les paramètres λ et Z sont respectivement le facteur d'amortissement permettant de définir l'intensité de la contrainte « lissage » dans l'inversion et le paramètre qui contrôle l'anisotropie. La qualité d'inversion est contrôlée par le RMS (Root Mean Squared) et le Chi^2 , qui sont calculés par les équations (2) et (3). Le RMS mesure la somme du carré des différences entre les résistivités électriques apparentes mesurées et calculées. Le Chi^2 correspond à la différence entre les résistivités mesurées et calculées normalisée par l'erreur propre de chaque quadripôle de mesure ε . Pour avoir un modèle qui reproduit mathématiquement les résistivités apparentes mesurées, il faut que le RMS soit le plus faible possible (Günther, 2004).

$$RMS = \sum (\rho_{cal} - \rho_{mes})^2 \quad (2) \quad \text{Chi}^2 = \frac{(\rho_{cal} - \rho_{mes})}{\varepsilon} \quad (3)$$

Les modèles géophysiques obtenus après inversion ont été classifiés suivant les gammes de résistivité correspondant aux couches d'altérites, de zone fissurée altérée et de socle sain définies à partir de diagraphies réalisées dans les forages. Les diagraphies n'ayant pas encore été réalisées au moment de la rédaction de ce résumé, nous avons utilisé les valeurs proposées par certains auteurs (e.g. Chaudhuri et al., 2013) en milieu de socle. Pour chaque section, les épaisseurs des formations ainsi obtenues après classification sont comparées au litholog du forage à proximité duquel il passe avant de passer à l'interprétation géologique et hydrogéologique.

IV. RESULTATS

IV.1. Profil d'altération en 1D

L'analyse des 18 lithologs dont certains sont présentés sur la figure 4 montre que les profils d'altération sur chacune des trois formations observées sur le bassin obéissent à une structuration verticale classique qui, du sommet à la base, se décompose comme suit : i) la couche allotérite, riche en kaolinite, ii) la couche isaltérite, couche de granite ou migmatite ou roche verte altérée caractérisée par une altération argilo-sableuse, iii) la couche fissurée, couche intermédiaire entre le socle substratum sain et la couche isaltérite et au niveau de laquelle les arrivées d'eau sont observées au cours de la foration au marteau-fond-de-trou (elle est caractérisée par des cuttings qui présentent à la fois des éléments de roche altérée et de roche originelle), iv) le socle sain qui est soit des granites, soit des migmatites, soit des metabasaltes parfois fracturés comme en témoignent les arrivées d'eau constatées au cours de la foration dans certains substratums sains. Aussi, les profils sont généralement recouverts de fines épaisseurs de sable latéritique sauf au niveau des crêtes où ils sont recouverts de cuirasse latéritique pouvant atteindre 8 m d'épaisseur.

L'analyse des profils cuirassés au niveau des bancotières dans le bassin de Sanon, montrent au sommet une dalle ferrugineuse supérieure, à allure conglomératique en surface par la mise en relief de nodules violets vernissés. Ces nodules se fondent ensuite dans la masse de la dalle. Cassés, ces nodules laissent apparaître de fins pores. En dessous de la dalle ferrugineuse, se trouve une première matrice argilo-sableuse indurée à structure feuilletée horizontale en dessous de laquelle une seconde matrice bariolée argilo-sableuse indurée apparaît sur une profondeur de 4 m en moyenne. Cette matrice non diaclasée présente de nombreux vides non interconnectés.

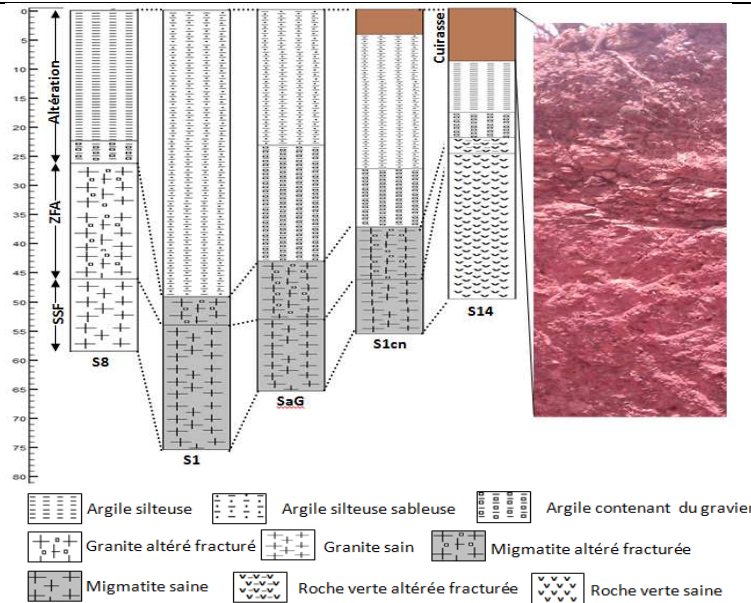


Figure 4 : Illustration de quelques profils d'altération sur granite, migmatite et roche verte

Bien que la structuration du profil d'altération décrite plus haut soit classique, des différences d'épaisseurs parfois très marquées sont observées au sein d'un même type de formation en fonction de la topographie ou de la position relative du profil considéré par rapport au centre bassin où un dôme piézométrique a été observé (Compaoré et al., 1997). En effet, sur les migmatites le profil d'altération est plus épais au niveau centre du bassin où la couche altération (allotérite + isaltérite) atteint en moyenne 50 m d'épaisseur. On note quelque fois la disparition de la couche d'isaltérite au profit de la couche d'allotérite. L'épaisseur du profil diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre de la vallée pour atteindre sa plus petite valeur vers les versants où elle vaut en moyenne 30 m. Sur les roches vertes et les granites, des différences marquées au niveau du profil d'observation n'ont pas pu être observées en raison du nombre d'échantillons disponibles pour ces formations (3 pour les roches vertes et 2 pour les granites).

IV.2. Structuration et géométrie du profil d'altération de crête en crête

L'analyse des modèles géologiques (Fig.5) issus du traitement des données ERT des profils PS1, PS15 et PSaG révèle :

- i) Pour chacun des profils, la géométrie du modèle géologique (en 1D) aux positions des forages S1, S15 et SaG est en adéquation avec la géométrie des lithologs issus de ces forages.
- ii) Sur chacun des profils, on note la présence de quatre couches décrites par le modèle conceptuel classique en zone de socle à savoir les couches d'allotérite et d'isaltérite dont l'ensemble forme la couche d'altération, la zone fissurée et le socle sain. Un recouvrement résistant (400 à 1000 Ω .m) est signalé au niveau des crêtes correspondant aux carapaces indurées de cuirasse et au niveau de la vallée correspondant aux sables latéritiques secs.
- iii) Le profil d'altération est plus épais au niveau de la vallée centrale et est caractérisé par une forte tendance argileuse (résistivité inférieure à 70 Ω .m). A cet endroit, l'horizon fissuré est moins épais (10-15 m) avec une résistivité moyenne de 500 Ω .m. Quant à la roche saine (résistivité supérieure à 1000 Ω .m), elle se trouve à une profondeur d'environ 50 m dans la vallée. Cette épaisseur diminue au niveau des crêtes où la couche d'allotérite est quasi inexistante. Au niveau des crêtes, le profil d'altération est marqué par un épaissement de l'horizon fissuré et une légère remonté du socle, plus accentuée au niveau de la crête sud.

iv) Des zones de fractures probables du socle sain (Fig. 5 et 6) caractérisées par un épaissement de l'altération aux droits desquelles le socle semble être compartimenté. Ce qui permet de proposer une carte des fractures majeures du bassin orientées N100-N120° E et N170°E.

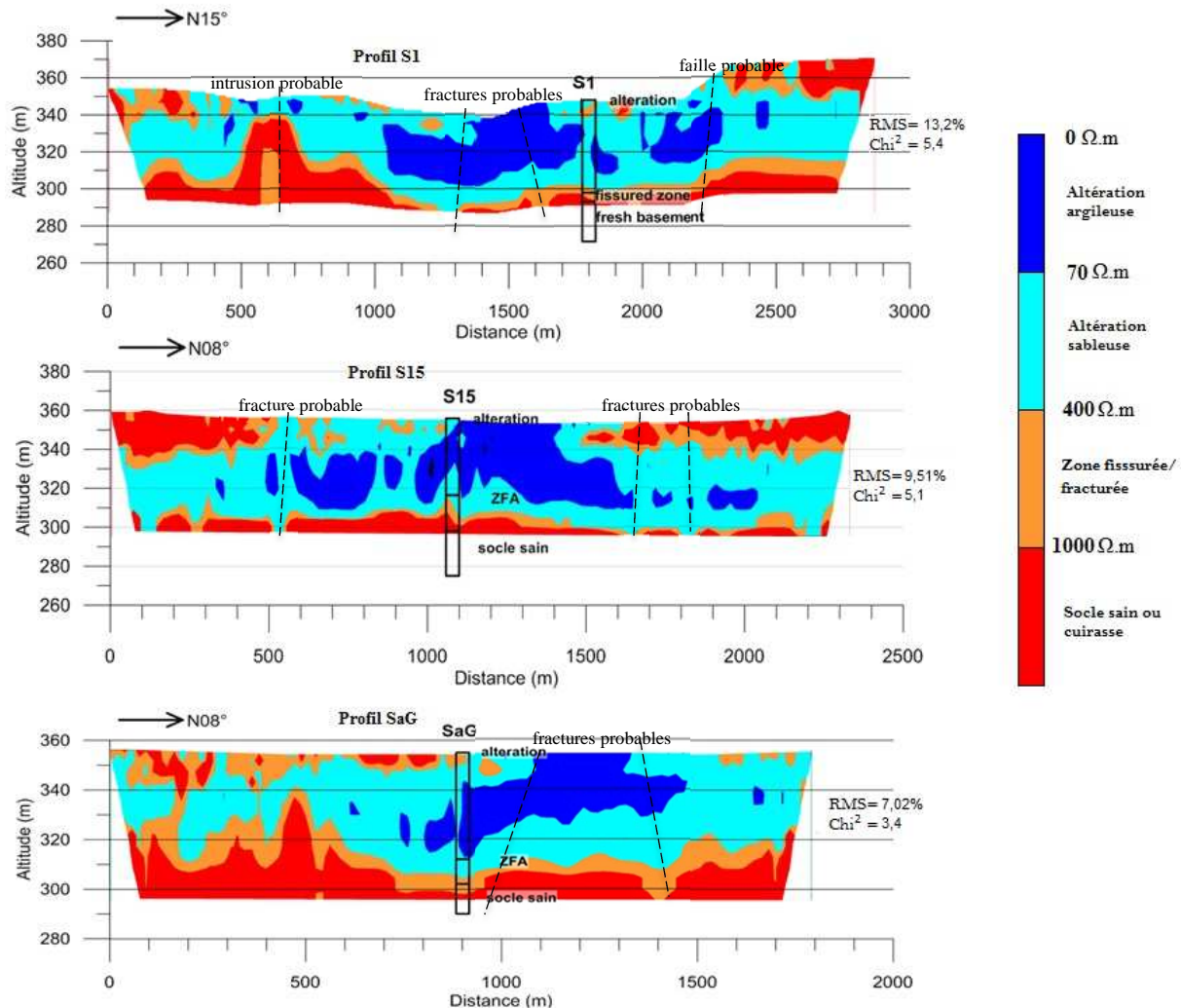


Figure 5 : Modèles géologiques après classification des résistivités calculées

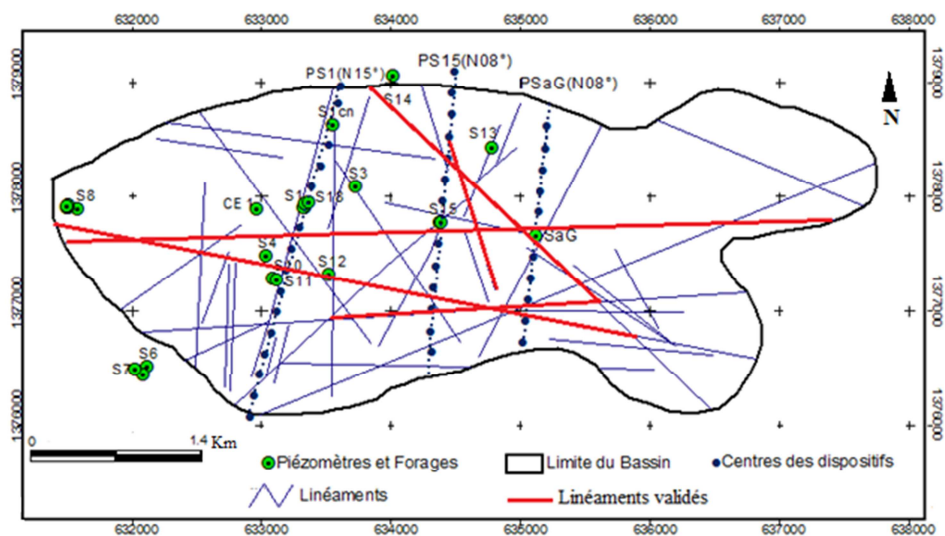


Figure 6 : Carte de fractures majeures (en rouge) validées par l'ERT

Le modèle géologique ainsi décrit explique le comportement hydrogéologique du bassin de Sanon. En effet, la présence de la cuirasse latéritique sur les crêtes favorise le ruissellement des eaux météoriques vers la vallée centrale qui devient une zone préférentielle de recharge en raison de sa structure sableuse en surface. Les eaux ruisselées s'y concentrent, s'infiltrent et il en résulte une recharge localisée de la nappe, d'où l'existence d'une zone de dôme piézométrique confirmée par la carte piézométrique (Compaoré et al., 1997).

V. COMPARAISON DU PROFIL D'ALTERATION PROPOSE AU PROFIL D'ALTERATION PROPOSE EN MILIEU DE SOCLE SOUS CLIMAT TROPICAL HUMIDE D'AFRIQUE DE L'OUEST

Le modèle conceptuel géologique proposé sous climat sahélien au Burkina Faso (cette étude) est comparé à celui proposé par Koïta et al. (2013) en Côte d'Ivoire sous climat tropical humide. L'histoire géologique de ces deux pays s'intègre dans celle du craton Ouest Africain. Les différentes formations géologiques qui y sont issues ont subi de l'Eocène au Quaternaire récent les mêmes grands événements tectonomorphologiques, responsables des modèles actuels. L'analyse de ces deux modèles conceptuels en 1D (échelle du forage) et en 2D (des buttes cuirassées jusqu'à la vallée) révèlent des similitudes et des divergences tant au niveau de la géométrie que de la structure.

Le profil d'altération proposé sous climat sahélien présente du sommet à la base la même structuration verticale avec quatre couches distinctes comme celui proposé sous climat humide : la couche d'allotérite, la couche d'isaltérite, la couche altérée fissurée et la roche saine. A l'échelle du bassin dans les deux modèles, les couches ne sont pas stratiformes. Elles ont des épaisseurs variables dont l'évolution spatiale est soulignée par la topographie récente. En effet, le profil d'altération sous climat sahélien présente une épaisseur faible au niveau des buttes cuirassées (vers les crêtes) et une épaisseur importante au niveau de la vallée. Cette configuration est contraire à celle démontrée sous climat humide par les études antérieures (Avenard et al., 1971 ; Koïta et al., 2013) où le profil d'altération est plus complet et important au niveau des buttes cuirassées et faible dans les vallées marquées par un surcreusement du lit des cours d'eau laissant parfois apparaître le substratum sain. Ces différences constatées entre les deux types de profil seraient liées aux processus tectoniques, morphogénétiques de cuirassement, à l'anisotropie des propriétés hydrodynamiques des cuirasses (Bonsor et al., 2014) et à l'action de l'eau sous climat humide et sec, responsables de la dynamique actuelle (Avenard et al., 1971 ; Roose, 1978 ; Maignien, 1958). En effet, dans la zone tropicale humide, les buttes cuirassées densément diaclasées (Avenard et al., 1971), sont recouvertes de végétaux réduisant considérablement le ruissellement et favorisant l'infiltration des eaux, provoquant ainsi un front de percolation (Wyns, 2013) précurseur d'une altération météorique profonde. En revanche, sous climat sahélien, les cuirasses sont très peu diaclasées et dénudées. L'eau ruisselle sur ces surfaces peu protégées par la végétation qui donnent naissance à des écoulements qui peuvent être torrentiel (Maignien, 1958). De ce fait, en milieu sahélien, la vallée est une zone préférentielle d'infiltration et donc de recharge. Cette infiltration dans la vallée serait aussi favorisée par la fracture Est-Ouest identifiée sur la carte linéamentaire et validée par l'ERT. Aussi, la faible pente dans la vallée réduit le phénomène d'érosion et permet un temps de séjour plus long favorable à une altération météorique profonde.

La conséquence du point de vue hydrogéologique de cette différence de comportement du profil d'altération de crête en crête est que les bassins versants topographique et hydrogéologique sous climat sahélien ne sont pas superposés. En d'autres termes, les buttes cuirasses ne coïncident pas avec les lignes de partage des eaux souterraines.

VI. CONCLUSION

L'analyse des lithologes et les différents profils de tomographie de résistivité électrique nous ont permis de comprendre la structuration et la géométrie du profil d'altération en milieu sahélien. Ainsi, nous avons pu observer que la structure du profil d'altération est classique (zone altérée, zone fissurée/fracturée et socle sain). En revanche, la comparaison des profils d'altération en milieu tropical sahélien et en milieu tropical humide de crête en crête montre deux configurations différentes. En effet, l'épaisseur d'altération est plus importante dans la vallée qu'au niveau des crêtes en milieu sahélien. Ce constat est contraire de celui fait

en milieu tropical humide alors que ces deux milieux ont subi les mêmes processus morphotectoniques. L'altération ainsi décrite serait postérieur au cuirassement.

En perspective, nous étudierons l'incidence hydrodynamique d'une telle structuration et géométrie.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce au Projet GRIBA (Groundwater Resources In Basement rocks of Africa) financé par l'Union Africaine et l'Union Européenne (grant AURG/098/2012).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Avenard J.M., Eldin M., Girard G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaumet J.L., Adjanohoun E. et Perraud A. (1971). Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. ORSTOM, Mémoire N° 50, 391 p.
- Bonsor H.C., MacDonald A.M. and Davies J. (2014). Evidence for extreme variations in the permeability of laterite from a detailed analysis of well behaviour in Nigeria H. C. *Hydrological Processes*, Volume 28, pp. 3563-3573.
- 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
- Chaudhuri A., Sekhar M., Descloitres M., Godderis Y., Ruiz L. and Braun J.J. (2013). Constraining complex aquifer geometry with geophysics (2-D ERT and MRS measurements) for stochastic modelling of groundwater flow. *Journal of Applied Geophysics*, Volume 98, pp. 288-297.
- Compaoré G., Lachassagne P., Pointet T. et Travi Y. (1997). Evaluation du stock d'eau des altérites: expérimentation sur le site granitique de Sanon (Burkina Faso). IAHS No. 24, pp. 37-46.
- Dahlin, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, Volume 27(9), pp. 1019-1029.
- Dahlin T. and Zhou B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, Volume 52, pp. 379-398.
- Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J.C. and 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*, Volume 330, pp. 260-284.
- Günther T. (2004). Inversion methods and resolution analysis for the 2D/3D reconstruction of resistivity structure from DC measurements. Thesis, Univ. of Mining and Technology, Freiberg, Germany, 160 p.
- Hottin G. et Ouédraogo O.F. (1975). Notice explicative de la carte géologique au 1/1000000è de la République de Haute Volta. Editions du BRGM.
- Kabré P.W. (2012). Caractérisation hydrogéologique en milieu de socle fracturé : Cas de la province de Kourwéogo. Mémoire de fin d'études Master, Fondation 2iE, 45 p.
- Koïta M. and Jourde H. (2011). Hydrogeological properties of fractured rocks (granites, metasediments and volcanites) under the humid tropical climate of West Africa: In N. Lambrakis et al. (Eds.), *Advances in the Research of Aquatic Environment*, Volume 2, pp. 3-10.
- 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.
- Maignien R. (1958). Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique occidentale, 239 p.
- Matthys A.D., Kai T.W. and Van Rooy L. (2009). Groundwater occurrence in basement aquifers in Limpopo Province, South Africa: model-setting-scenario approach. *Environmental Earth Sciences*, Volume 59, pp. 459-464.
- Lachassagne P., Wyns R. and Dewandel B. (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, Volume 23, pp.145-161.
- Leprun J.C. et Nahon D. (1973). Cuirassements ferrugineux autochtones sur deux types de roches. *Bulletin de la Société Géologique de France*, Volume 15 (3-4), pp. 356-361.
- Sander P. (2007). Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. *Hydrogeology journal*, Volume 15, pp. 71-74.
- Roose E.J. (1978). Dynamique actuelle de quelques types de sols en Afrique de l'Ouest. Communications au Séminaire de l'Union Internationale de Géographie "Expérimentations de terrain en Géomorphologie" à Paris, 23 p.

Wyns R. (2013). Les altérations: un enregistrement des mouvements verticaux des lithosphères continentales, un concept de réservoir dans les roches cristallines. *Présentation Conférence EnSciTerre*

Wyns R., Baltassat, J.M., Lachassagne, P., Legchenko A., Vairon J. and Mathieu F. (2004). Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la société Géologique de France*, Volume 175, pp. 21-34.