

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.

III. EFFET DE L'ANISOTROPIE

III.1 Sur la propagation de l'influence des pompages

Le phénomène d'anisotropie ne semble pas bénéficier de la même popularité que l'hétérogénéité, alors que ses mérites ne sont pas moindres et les conséquences tout aussi importantes sur le mode de mise en valeur des ressources en eau du socle.

Lorsque l'on dispose d'ouvrages nombreux, proches et convenablement disposés, mais nécessairement en connexion avec des fissures ouvertes hydrauliquement actives, il est possible de constater que l'influence des pompages se propage mieux suivant certaines directions, également visibles en prospection électrique. Un exemple pris en Côte d'Ivoire (Faillat et Drogue, 1987) a permis de voir la relation entre anomalie électrique conductrice, épaisseur des altérites, relativement plus importante, et présence d'une fissure de même orientation que l'anomalie conductrice. La Figure 1 montre le dispositif employé, comportant des forages dans le socle fissuré (P1 à P8), des

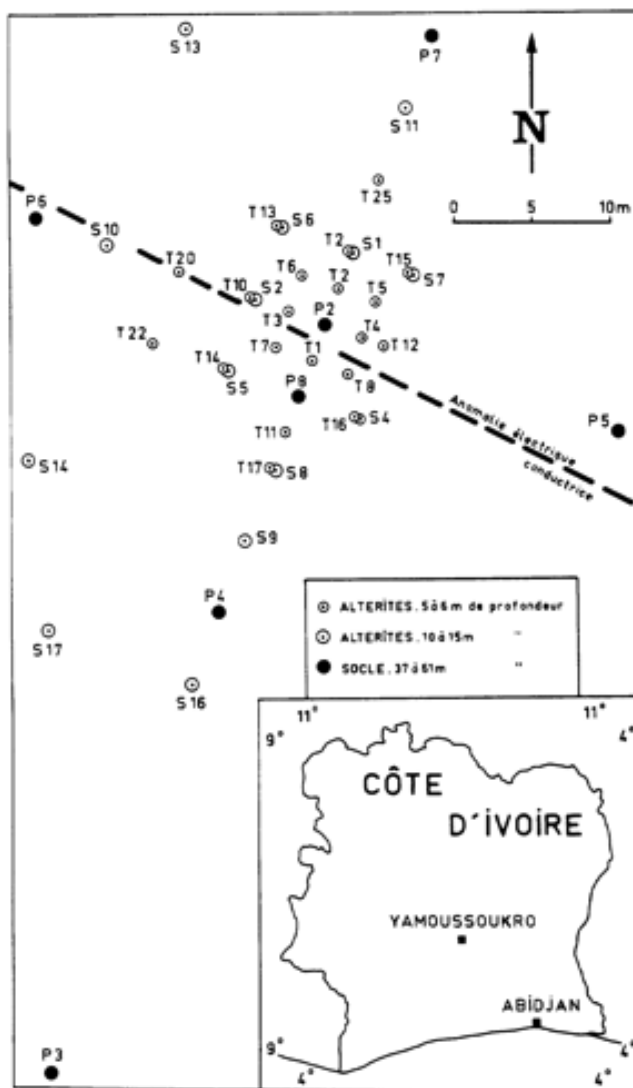


Figure 1 - Site expérimental de l'ENSTP de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)

forages dans le socle fissuré (P1 à P8), des

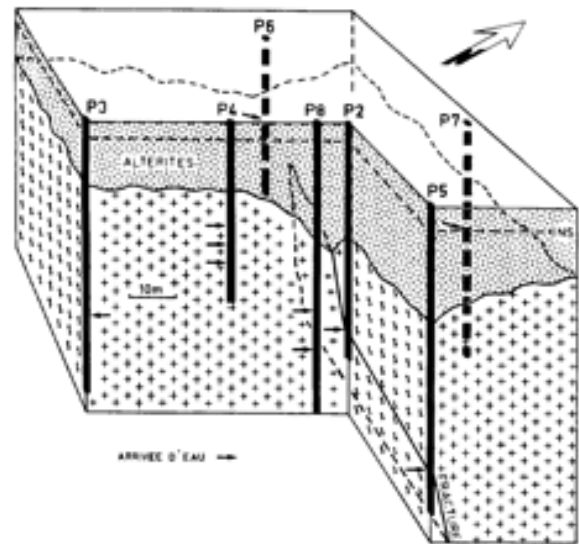


Figure 2 - Bloc-diagramme montrant la relation entre forages et fissure principale

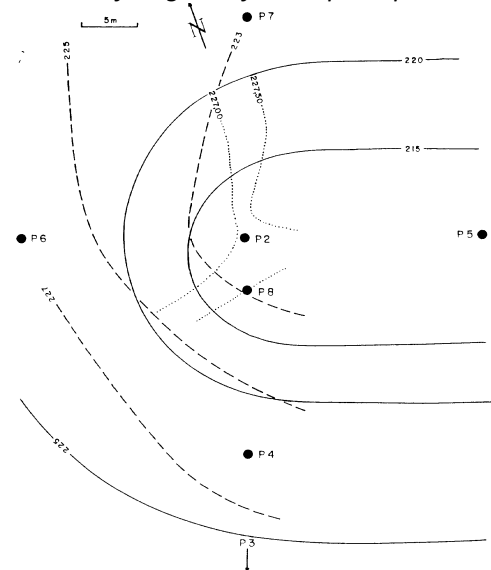


Figure 3 - Piézométrie indicative en pompage dans les 3 types d'ouvrages

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

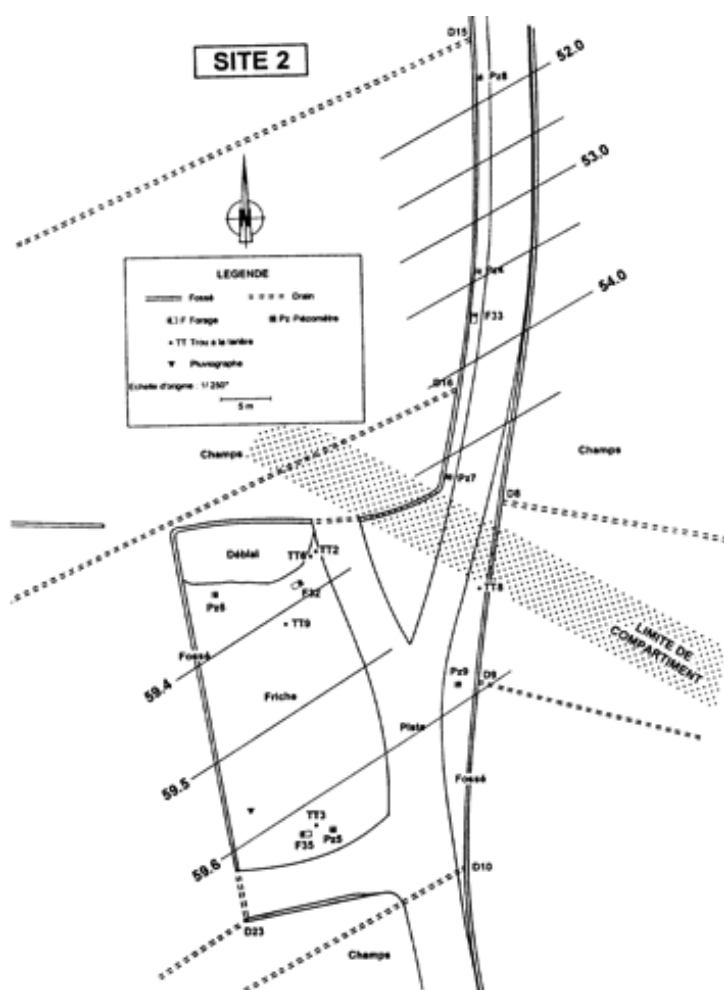


Figure 4 - Site 2 du périmètre expérimental de Kerveldréach (Finistère). Piézométrie au repos montrant environ 5 mètres de décalage entre les 2 compartiments (Somlette, 1998)

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 pompage 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 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 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.

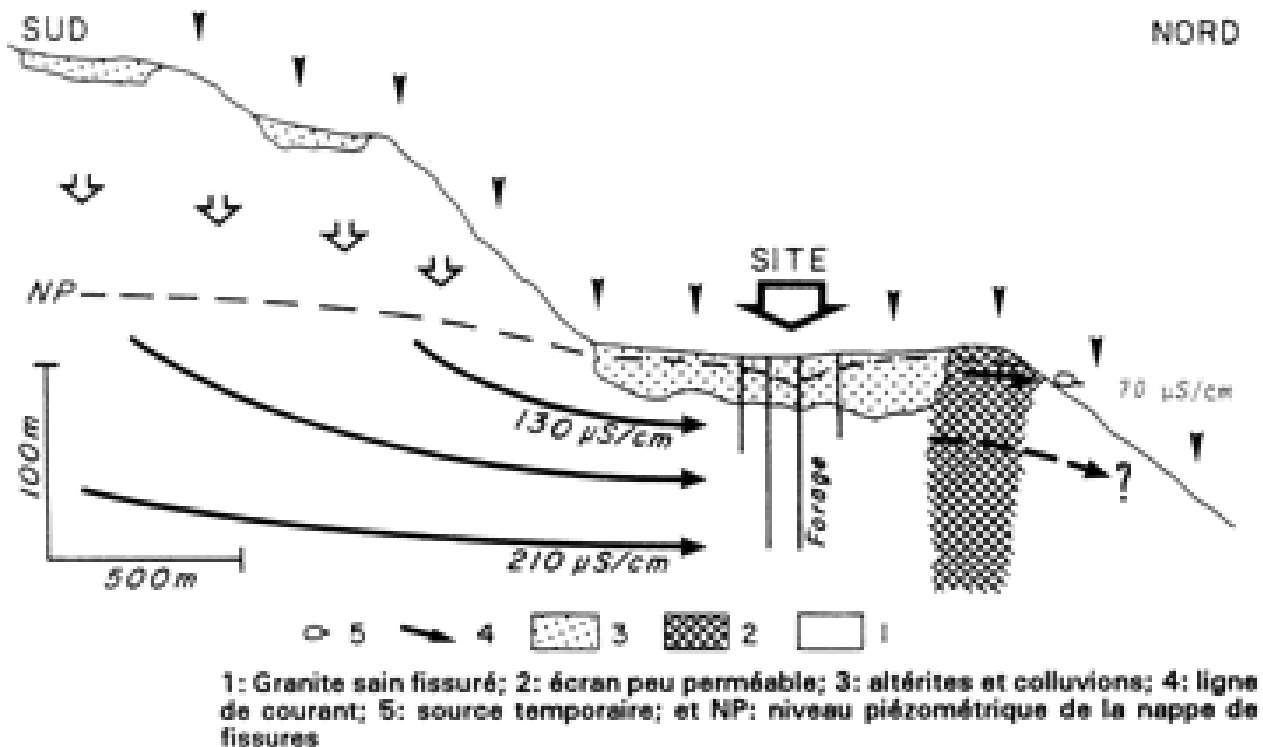


Figure 5 - Site expérimentale du captage de la commune de Campoussy (Pyrénées Orientales). Coupe montrant l'effet d'un écran peu perméable sur la préservation d'une nappe.
Conductivité électrique à 20°C

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

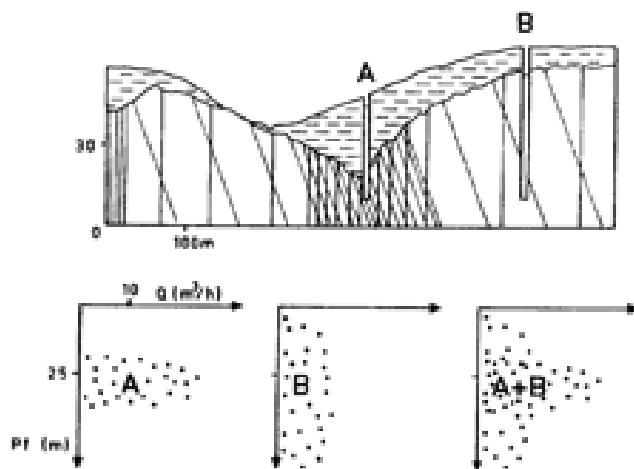


Figure 6 - Schéma explicatif de l'influence de l'hétérogénéité de fissuration sur les débits instantanés et la profondeur des forages

dures.

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

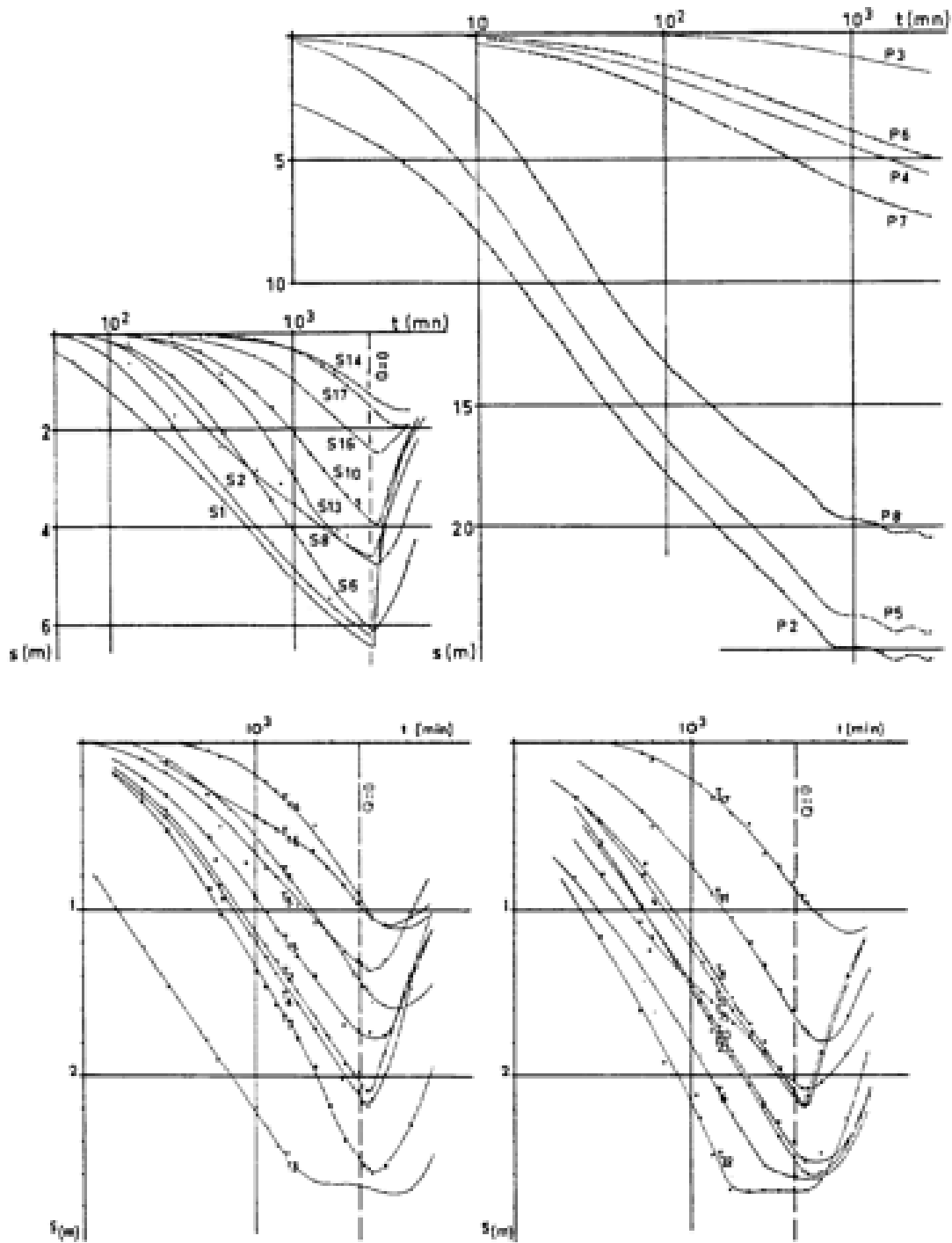


Figure 8 - Site expérimental de Yamoussoukro. Courbes de rabattement dans les ouvrages P, S et T. Pompage d'avril 1982 dans P2

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.

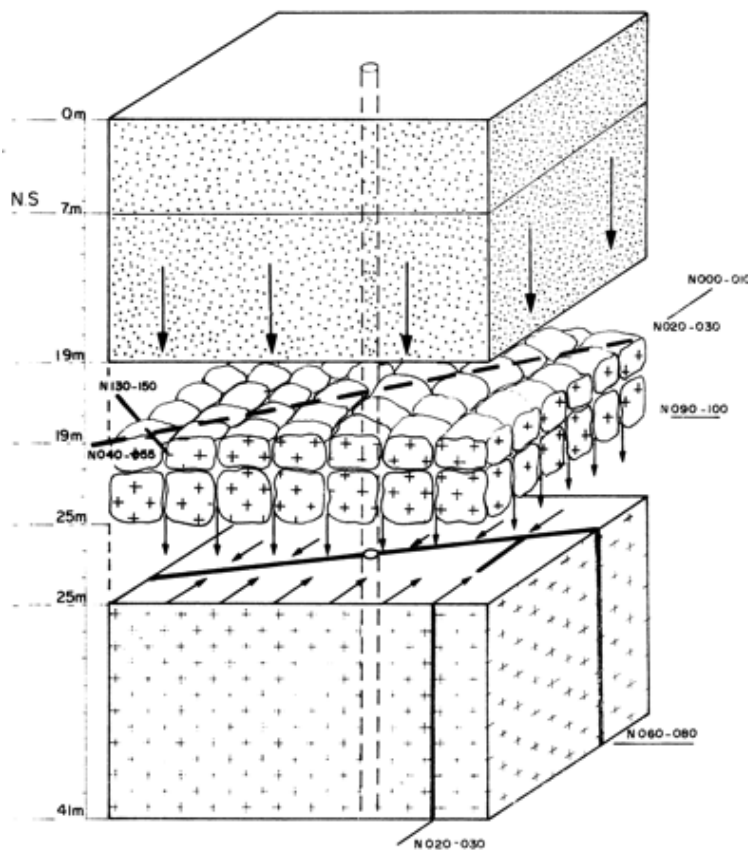


Figure 10 - Schéma d'organisation et de fonctionnement du site expérimental de Zigla Koulpélé (Burkina Faso), composé de 1 forage de 41,5 m et de 3 piézomètres de 16 à 26 m de profondeur, distants de 5,2 à 10,05 m du forage, dans des granito-gneiss (Engalenc, 1979)

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 Géohydrologie, 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.