



HYDROGÉOLOGIE DES MILIEUX FISSURES

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

**SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL**

**ALIMENTATION EN EAU DES ZONES RURALES  
DES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT**

**Compte-rendu du Séminaire tenu à Orléans les 7 et 8 septembre 1983**

**Rapports de synthèse**

**Département EAU**

Rapport du B.R.G.M.

**83 SGN 917 EAU**

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

**SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL**

**B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01**

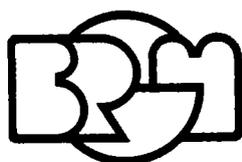
# **ALIMENTATION EN EAU DES ZONES RURALES DES PAYS EN VOIE DE DÉVELOPPEMENT**

**Compte-rendu du Séminaire tenu à Orléans les 7 et 8 septembre 1983**

**Rapports de synthèse**

par

**M. LE NIR, J.C. NAPIAS, T. POINTET, P. VAUBOURG**



**Département EAU**

**B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01**

Rapport du B.R.G.M.

**83 SGN 917 EAU**

## AVANT-PROPOS

Le présent document rassemble et résume les interventions des 60 participants au Séminaire "Alimentation en eau des zones rurales des pays en voie de développement", synthétisées et présentées par quatre rapporteurs : MM. LE NIR, NAPIAS, POINTET et VAUBOURG.

La nécessité d'un tel séminaire interne spécialisé était apparue indispensable face à l'évolution des activités des équipes d'hydrogéologues chargés de programmes d'hydrogéologie dans les pays en voie de développement.

La tenue de ce séminaire avait été décidée par Paul SANGNIER qui, au cours d'une mission au Sahel, avait perçu un grand nombre des problèmes évoqués dans les pages qui suivent. Il était apparu en effet que l'isolement des équipes - parfois proches, mais séparées par les frontières étanches des Etats - était préjudiciable à la réflexion sur l'amélioration des méthodes, l'évolution des techniques et des objectifs, l'approche commerciale et sociale des projets.

Un contact multilatéral et collectif des dizaines de praticiens actuels, ainsi que des anciens et futurs praticiens de l'hydraulique villageoise est nécessaire. Tel aura été l'objectif prioritaire de ce Séminaire.

On notera que les textes des deux rapports techniques (thèmes 1 et 2) ne comportent que peu d'illustrations. Une iconographie abondante accompagne le Manuel : "Prospection et exploitation d'eau souterraine en milieu fissuré"(1), actuellement en cours de préparation et auquel les lecteurs se reporteront avec profit.

Nous attirons plus spécialement votre attention sur le thème 3, nouveau pour beaucoup d'entre vous. Il convient que tous, même ceux qui pensent encore n'exercer aujourd'hui que des responsabilités techniques, se persuadent de l'importance de l'approche socio-économique et de la complexité des montages financiers. L'acquisition des compétences dans ce domaine est une nécessité, non seulement pour le bon déroulement de carrière des agents, mais une nécessité pour l'Etablissement ; la nature des offres, des programmes et des coopérations locales requiert une responsabilisation de tous, sur toutes les facettes de notre activité, du montage à la gestion.

Enfin, formation et coopération, objets d'une partie du thème 4, demandent à tous disponibilité intellectuelle et entretien d'une vigilance technique qui se traduit par des publications, conférences, illustrations diverses. Cet aspect du comportement du B.R.G.M., capable d'assurer le "continuum" entre recherche, formation, ingénierie, gestion, est un des aspects positifs de notre image de marque qu'il convient de développer.

J.J. COLLIN

H. MOUSSU

---

(1) coordonné par H. PLOTE

## SOMMAIRE

pages

Thème 1 : EVALUATION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LES MILIEUX FISSURES SOUS CLIMATS ARIDE ET SEMI-ARIDE - Pompages d'essais, réception d'ouvrages	1
Thème 2 : TECHNIQUES DE PROSPECTION DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU FISSURE	23
Thème 3 : ANALYSE DES BESOINS ET DU MARCHE - Présentation des offres et montage des projets	41
Thème 4 : FORMATION ET TRANSFERT DES CONNAISSANCES - Maintenance des équipements de captage et d'exhaure	65
LISTE DES PUBLICATIONS PRESENTEES AU SEMINAIRE	75

\* \*

\*

Thème 1

EVALUATION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LES MILIEUX FISSURES SOUS  
CLIMATS ARIDE ET SEMI-ARIDE  
Pompages d'essais, réception d'ouvrages

par

T. POINTET

avec l'aide des contributions écrites de D. FOLHEN, B. HENOU,  
J. MARGAT, V. PETIT, H. PLOTE, H. TALBO, D. THIERRY



## LES RESSOURCES EN EAU DES MILIEUX ROCHEUX FISSURES

Au cours des dernières années, la prospection et l'exploitation de ressources en eau en milieux fissurés ont connu, dans de nombreux pays, un développement considérable. Grâce notamment à la mise en oeuvre de moyens techniques nouveaux (sondeuses équipées de marteaux fond-de-trou), des milliers de forages ont pu être réalisés et mis en exploitation dans des zones considérées jusqu'alors comme pauvres, voire dépourvues de ressources en eau souterraine.

L'expérience nous a appris petit à petit à mieux implanter ces forages et à augmenter les chances de succès de leur réalisation. Mais c'est aussi parce qu'on sait mieux faire des forages et que l'on en fait de plus en plus que l'on est conduit à se préoccuper davantage de la durée, de la pérennité, de leur exploitation que par le passé.

### 1 - LA NOTION DE RESSOURCE EN EAU

La pérennité de l'exploitation implique la notion de ressource, d'une ressource qui évolue de façon naturelle, mais aussi parce qu'on l'exploite. Cette évolution se manifeste de façon immédiate par des variations des niveaux d'eau dans les forages qui sont les points d'eau, témoins principaux, sinon exclusifs de ces milieux. Cette eau est un bien essentiel et toute baisse durable d'un niveau constitue un indicateur d'insécurité.

La pérennité des débits se traduit par une question posée en ces termes :

*"Quelle ressource peut-on associer à un forage ou un groupe de forages, comment peut-on le gérer pour qu'elle assure la sécurité de l'approvisionnement ?"*

La base de toute évaluation chiffrée est la définition d'une échelle spatiale : quel est le volume de terrain qui est intéressé par le forage que l'on exploite ? Et à partir de là, quelle est son architecture, son fonctionnement hydraulique, comment est-il alimenté ? C'est aussi une échelle de temps : l'échelle du cycle annuel ou de la série d'années qui comprend une succession d'années sèches et d'années humides, afin que l'on puisse annuellement garantir l'exploitation par delà la saison sèche.

## 2 - FONCTION CONDUCTRICE ET FONCTION CAPACITIVE

Tout milieu aquifère assure deux fonctions : par sa porosité il permet le stockage de l'eau qui la pénètre. Plus cette porosité est élevée, plus le stock par unité de volume de roche est important. Mais pour que ce stock se constitue et soit mobilisable, il faut que le milieu soit perméable, c'est-à-dire qu'il ait une fonction conductrice.

En milieu poreux, les deux fonctions sont assurées simultanément par les vides communicants de la matrice de la roche qui sont à la fois le passage et le réservoir.

Les milieux fissurés sont au contraire des milieux discontinus, hétérogènes dans lesquels les vides sont, de nature, très divers ; petite fissure, diaclases, fractures avec ou sans déplacements, altérites poreuses associées à des fractures.

Les deux fonctions sont alors assurées à divers degrés, simultanément ou séparément, par ces vides : des sous-unités de ce milieu composite auront, selon le type de vides qui les affecte, une porosité plus marquée que la perméabilité : elles seront capacitives et assureront le stockage de l'eau. Celles au contraire où la perméabilité sera le paramètre dominant seront essentiellement conductrices. D'autres enfin seront mixtes.

### 2.1 - Porosité et fonction capacitive

La porosité en tant qu'indice de la roche, et de la même façon, le coefficient d'emmagasinement en temps que caractéristique volumique du milieu aquifère, ont des valeurs généralement très faibles. Karrenberg\* cite pour toutes roches magmatiques et pour la plupart des roches volcaniques massives, des porosités, mesurées sur des ensembles rocheux, comprises entre 0,2 et 1,8 %. Les roches volcaniques se présentant en coulées ont des possibilités bien supérieures, plus proches de celles des milieux aquifères poreux, bien qu'elles conservent les caractères discontinus des milieux très fracturés.

---

\* H. Karrenberg. - Hydrogeologie der nichtverkarstungsfähigen Festgesteine, 1981, Springer - Verlag

## 2.2 - Perméabilité et fonction conductrice

Il s'agit d'une propriété du milieu discontinu dont l'irrégularité de répartition et les valeurs globales faibles sont les traits marquants.

C'est là où les familles de fractures ouvertes permettent la circulation de l'eau. Ce sont les discontinuités mêmes du milieu, surfaces plus ou moins planes et sécantes lorsqu'elles sont conduites par deux directions structurales au moins.

Ces familles ayant entre elles divers degrés de connexion sont à leur tour connectées, par le jeu des fissures et des micro-fissures, aux sous-systèmes capacitifs qui sont des volumes de roches (fig. 1).

Le mode d'exploitation de l'eau par puits ou forage souligne cette nature discontinue du milieu fracturée. Un ouvrage introduit une condition ponctuelle au voisinage, ou sur une fracture c'est-à-dire grossièrement un plan. Ce plan est, ou n'est pas, raccordé aux autres plans du réseau de fractures. Ces connexions ne sont pas systématiques entre fractures voisines, c'est-à-dire que la conduction effectivement sollicitée par l'ouvrage exploité, ne correspond qu'à l'activité d'une partie du réseau de fractures et conduit à considérer une perméabilité qui n'est pas indépendante du choix du point où s'effectue la mesure.

## 2.3 - Hétérogénéité et distribution des valeurs des paramètres

En raison de l'hétérogénéité des massifs, un paramètre hydraulique (perméabilité par exemple) n'est représentatif de la formation que s'il est mesuré un grand nombre de fois : ce paramètre est statistiquement représentatif, et si l'on fait l'hypothèse d'une continuité globale du phénomène d'écoulement, on calcule une valeur moyenne.

Là où un essai ponctuel, en milieu poreux, fait accéder à un niveau de connaissance donné, ce même niveau de connaissance en milieu fissuré nécessitera le recours à une série de mesures ponctuelles, rassemblées et traitées statistiquement. En retour une valeur statistique moyenne ne se retrouvera guère sur un seul ouvrage mais se vérifiera sur une série d'ouvrages, d'où un niveau d'incertitude permanent en prospection et un "coût" d'acquisition des paramètres élevé par comparaison avec les milieux poreux.

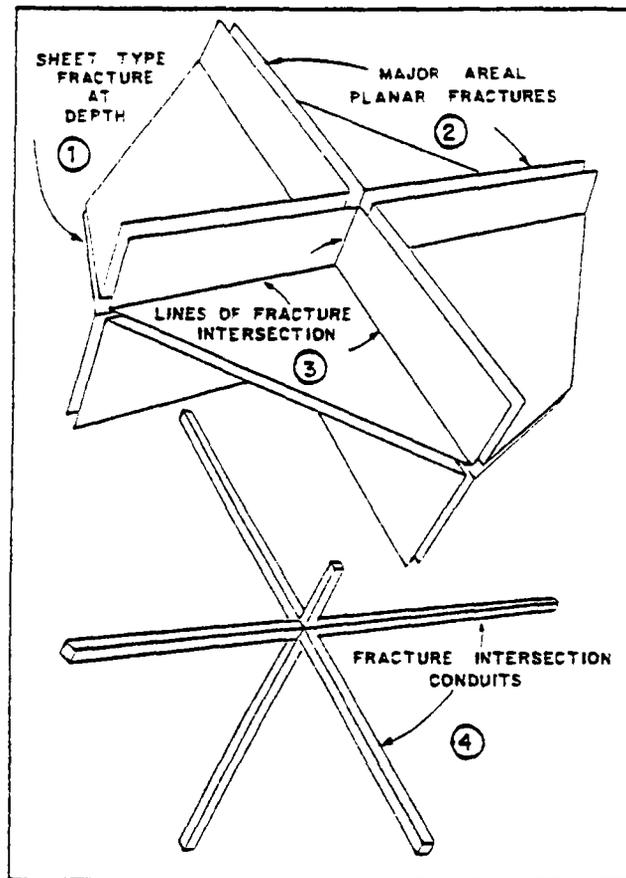


Figure 1 - Formation de "conduites" à partir de l'intersection de plans de fractures

(Extrait de Pumping Effects of Wells in Fractured Granitic Terrain)

par A.P. Kohut, J.C. Foweraker, D.A. Johanson, E.H. Tradewell and W.S. Hodge

in : Ground Water, vol. 21, n°5 p. 572.

- 1) Fracture de décompressions à moyenne profondeur
- 2) Fractures planes majeures
- 3) Intersection linéaire des plans de fractures
- 4) Conduits se développant à l'intersection des plans

Une conception traditionnelle attribue aux formations superficielles un rôle essentiellement capacitif et aux formations de roches fracturées le rôle productif. Ce schéma simple est loin d'être général mais fournit un guide commode du raisonnement.

Selon la puissance des niveaux altérés, et selon les taux de recharge annuelle, le niveau aquifère est, soit développé parallèlement dans le bedrock fracturé et les altérites, soit uniquement développé dans le bedrock fracturé, auquel cas les altérites ne jouent un rôle qu'au moment de la recharge (rétention) momentanée de l'eau et drainance descendante).

Il s'ajoute aussitôt à ce schéma, le rôle de la morphologie. Les niveaux meubles d'altérites peuvent être déplacés et donner naissance à des accumulations qui ne soulignent pas forcément une fracturation ouverte du socle. Les altérites des vallées peuvent être abondantes, saturées, mais sans fracturation sous-jacente exploitable, tandis que les reliefs présentent un niveau altéré aminci, mais parfois une fracturation sous-jacente ouverte par décompression, sèche ou aquifère selon la pluviosité.

Selon la nature du système fissural et la profondeur qu'atteignent les circulations actives, il peut se constituer des compartiments perméables autour de fractures très rapprochées, sensiblement parallèles à un accident majeur, accompagnées d'une altération plus profonde. Ces compartiments sont de véritables aquifères, parfois de plusieurs centaines de mètres de largeur, réagissant pratiquement comme un milieu poreux, et dont la perméabilité d'ensemble contraste avec celle de l'encaissement qu'ils drainent très lentement. Ceci se traduit en essai, dans un premier temps par un effet de pseudo-limite étanche, que l'on peut interpréter pour calculer la dimension du compartiment perméable. Ensuite se manifeste le drainage des compartiments encaissants, qui prend la forme d'une drainance latérale. Le milieu est alors mixte avec un encaissant faiblement poreux de perméabilité très faible, drainé par un massif d'extension limitée, poreux, perméable, hétérogène et généralement anisotrope, dans lequel les fractures parallèles à la direction d'allongement jouent un rôle privilégié (fig. 2).

### 3 - L'EAU DANS LE MILIEU FISSURE

#### 3.1. - *Distribution des écoulements naturels*

La zone d'influence d'un ouvrage fait partie d'un système hydraulique, siège d'un écoulement gravitaire naturel qui présente un mode de remplissage et un mode de vidange.

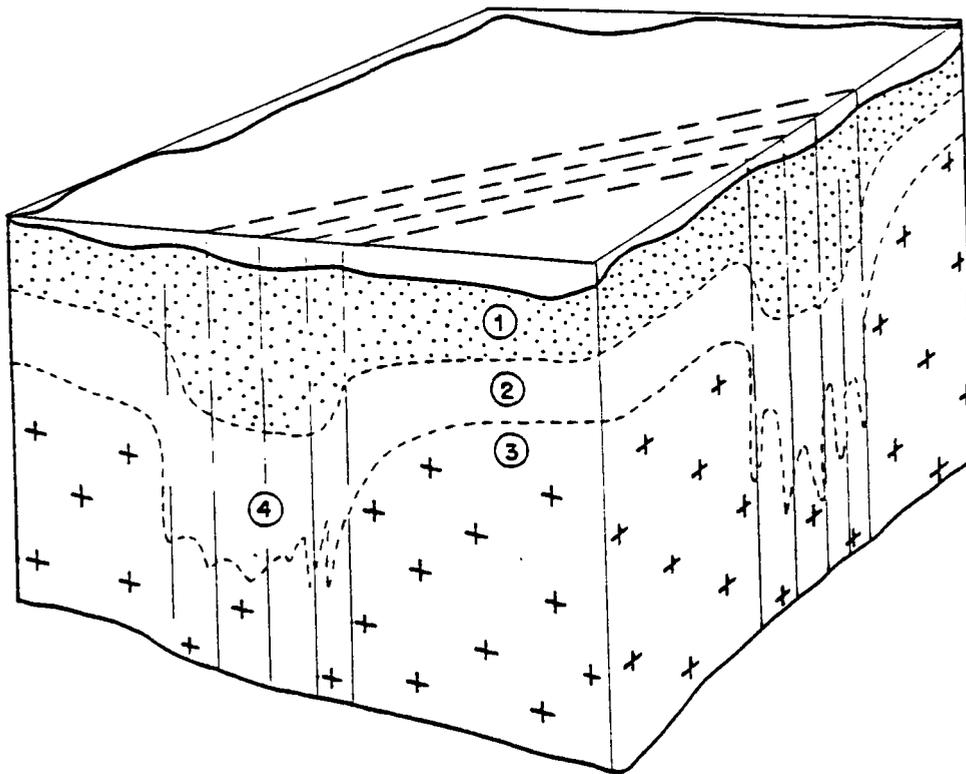


Figure 2 - Développement d'un compartiment fracturé/perméable dans un massif

- 1) Niveau d'altérite meuble
- 2) Roche altérée/fissurée en place
- 3) Roche saine (micro-fissurée sur une épaisseur de quelques dizaines ou centaines de mètres)
- 4) Compartiment fracturé perméable drainant le massif environnant

La recharge est le plus souvent directe, c'est-à-dire issue de l'infiltration des eaux de pluies : le processus intéresse de grande superficies.

Elle peut être indirecte sous certaines conditions d'aridité, chaque pluie étant à elle seule trop faible pour qu'une épaisseur suffisante de matériaux de couverture soit mise en saturation et que l'eau soit soustraite à l'évaporation.

Dans ce cas il y a préconcentration par ruissellement et seulement alors infiltration à partir des thalwegs.

L'infiltration la plus rapide s'effectue par les fractures qui viennent à l'affleurement. Elles sont généralement soulignées par l'érosion qui renforce l'effet collecteur par une forme en creux. Elle a lieu également, mais avec retard, à partir des horizons altérés dont la porosité engendre le stockage provisoire d'une masse d'eau qui est petit à petit libérée vers le système fissural. En volume d'eau ce deuxième mode est prépondérant en raison des grandes surfaces au sol qui sont intéressées.

La vidange du système s'effectue par des points bas de la topographie qui constituent la ou les condition(s), aval le plus souvent des vallées. L'eau quitte le milieu fissural par des émergences linéaires qui sont la trace des fractures sur la surface topographique, mais le plus souvent ces émergences sont masquées par un matelas de matériaux détritiques remplissant les fonds de vallée et assurant un effet diffuseur des venues d'eau localisées. On peut avoir dans ce cas constitution d'un petit aquifère en milieu poreux (fig. 3).

Dans un tel milieu, on peut par calcul simple avoir l'ordre de grandeur d'une vitesse moyenne d'écoulement ou d'un débit global, la vitesse dérivant d'un gradient hydraulique dont on connaît les potentiels extrêmes.

### *3.2 - Dans quels cas évaluer une ressource*

Le problème se pose en terme de ressource lorsque la perméabilité au voisinage de l'ouvrage est suffisamment élevée pour ne pas être le facteur limitant décisif. Plaçons nous dans ce cas.

Si la limite est atteinte, on aboutit à une exploitation du site au delà de ses capacités de renouvellement. Définir cette limite équivaut à définir la ressource exploitable, c'est-à dire à chiffrer le volume mobilisable et renouvelé sur un cycle naturel dans l'aire qui constitue la zone d'influence du

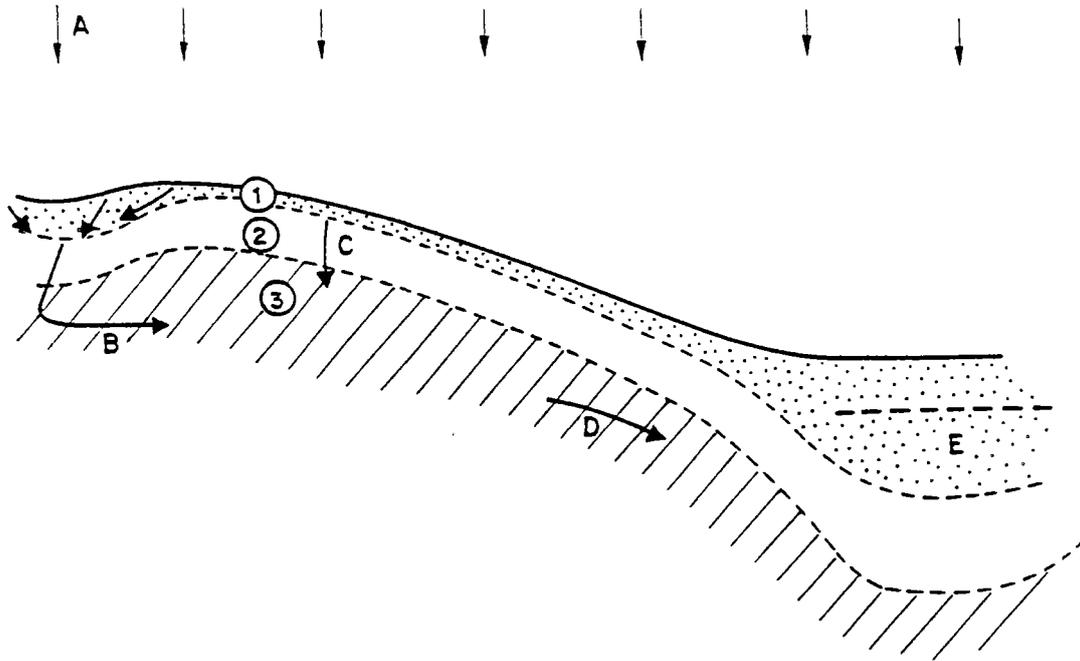


Figure 3 - Vidange d'un système simple (schéma)

- 1) Niveau d'altérites meubles : accumulation dans les dépressions de la morphologie. Aquifère de milieu poreux
- 2) Bedrock altéré/fissuré
- 3) Bedrock sain fissuré/fracturé et conducteur

A Pluie

B Infiltration rapide sur les fractures venant à l'affleurement

C Infiltration lente sur les zones peu fracturées - mise en saturation temporaire des altérites

D Drainage gravitaire

E Aquifère mixte poreux (drainage par les altérites) et fissuré (fractures plus ou moins ouvertes sur lesquelles se surimpose la morphologie)

dispositif de captage. Ce facteur pourra par la suite être rapproché des caractéristiques géologiques ou physiques du bassin en vue de faire un classement des formations, donc à la fois de réaliser une synthèse et de fournir un guide de prospection.

Il faut noter que fréquemment la ressource n'est pas la première préoccupation, lorsque l'on cherche à exploiter des faibles débits, car les capacités de stockage du milieu aquifère sont parfois considérables, comme le montre le calcul simple suivant. Un milieu fracturé/altéré saturé d'eau sur une épaisseur de 10 mètres présentant une porosité globale de 0,5 % (voir § 2.1) contient 50 000 m<sup>3</sup> d'eau par kilomètre carré. Si ce volume est mobilisable, il représente en zone aride, sur un an, à raison de 30 l/jour par habitant la demande en eau de 4 500 habitants. S'il est renouvelé, il suppose l'infiltration annuelle d'une lame d'eau de 50 mm seulement.

### *3.3 - Calcul de la ressource globale d'un bassin*

Trois façons de concevoir la ressource d'un système consistent de considérer l'eau qui entre dans le système, l'eau contenue dans le système, et l'eau qui en sort. A cela correspondent trois approches pour calculer un même volume.

Dans ces trois modes, la première démarche est commune, c'est la détermination des limites du sous-bassin influencé par l'exploitation et dont on cherche à calculer la ressource.

#### 3.3.1 - L'eau qui entre dans le système

Il s'agit d'évaluer une infiltration c'est-à-dire :

- mesurer une pluie
- estimer une pluie efficace puis une infiltration.

Si l'on sait mesurer une pluie, le calcul d'une infiltration est souvent imprécis. Mais il est généralement facile de contrôler la vraisemblance d'un ordre de grandeur calculé : si l'on examine la plupart des climats, les infiltrations sont comprises dans un intervalle 50-500 millimètres, c'est-à-dire échelonnées sur une puissance de 10. Il est relativement facile de réduire cet écart à une incertitude de 1 à 2 ce qui est déjà satisfaisant pour cette donnée si l'on

veut bien considérer que la précision n'est guère meilleur sur une perméabilité, ou un coefficient d'emménagement.

Pour calculer la pluie efficace, les méthodes Turc et Thornthwaite sont les plus connues. Moins classique est le recours aux bilans radiatifs qui consiste à associer le bilan hydrique atmosphère/sol au bilan thermique, diurne et nocturne plus facile à mesurer, et qui par conséquent fournit une évaluation indirecte de l'évapotranspiration.

### 3.3.2 - L'eau dans le système

Deux moyens sont envisageables, soit en chiffrant la porosité efficace de la roche, soit en testant le système pour mesurer un emménagement donc un volume d'eau.

En ce qui concerne la porosité efficace globale d'un milieu fissuré, on contrôle facilement la validité d'un ordre de grandeur (cf § 2.1) mais il est peu concevable d'avoir une mesure directe sur un site qui n'a pas fait l'objet d'expérimentation poussée. Cette porosité est variable d'un horizon à l'autre dans les altérites et selon le degré de décompression du milieu rocheux.

Un emménagement est plus facile à calculer, généralement sous la forme d'un paramètre global à partir de pompages d'essai.

### 3.3.3 - L'eau sortant du système

Ici encore deux moyens, soit en mesurant directement un volume, soit en testant un comportement.

Mesurer un volume sortant suppose que l'on ait identifié et équipé les exutoires, il faut pour cela qu'ils ne soient pas masqués par des formations de couverture.

Tester un comportement, est, par exemple, l'analyse des hydrogrammes et plus précisément des courbes de tarissement des sources ou cours d'eau alimentés par la vidange du système. Si l'on capte la totalité du débit sortant, cette courbe est une exponentielle décroissante de type "Loi de Maillet", de laquelle il est facile de déduire par intégration le volume d'eau contenu dans le système à un instant  $t$ .

Ces méthodes se complètent et sont généralement utilisées de façon couplée.

### *3.4 - Evolutions de la ressource et chroniques de mesures*

On sait actuellement très bien relier une chronique pluviométrique et l'évolution d'un niveau d'eau au moyen de modèles globaux. A défaut d'une connaissance analytique du milieu, la méthode pour être précise s'appuie sur un nombre assez élevé de mesures synchrones des pluies et niveaux d'eau. De telles mesures sont généralement disponibles dans les pays équipés. Elles manquent cruellement dans la plupart des pays en voie de développement. L'eau du socle y est souvent l'unique réservoir et le manque de données sur l'évolution de cette ressource conduit à considérer une baisse de niveau comme un indice d'insécurité dans la mesure où l'on ne dispose pas de moyens permettant d'analyser le fait.

Ainsi en Afrique Sahélienne on ne dispose d'aucune donnée fiable avant les années 70. La plupart des relevés avaient été faits sur des puits de grand diamètre dont on sait les insuffisances. A partir des années 70, on compte quelques ouvrages utilisés à des fins de mesure mais leur nombre très insuffisant rend le suivi de comportement des nappes très fragmentaire.

Parfois les variations de niveaux de nappes sont l'effet de changements intervenus dans l'environnement (déboisement, paturages, labour des sols), parfois on est confronté à de réels appauvrissements de nappes sans sollicitation excessive apparente. Certains pièges aquifères en terrain cristallin au Sénégal Oriental (où la pluviosité moyenne annuelle est de 900 mm) n'ont jamais été rechargés de façon notable après leur premier épuisement historique en 1973-74 (d'après H. Plote). Force est de constater que l'on est, la plupart du temps, doté de trop peu de moyens pour analyser les causes de telles variations de niveaux.

### *3.5 - La ressource associée à un ouvrage : Possibilités et limitations de l'exploitation*

Au voisinage du forage, c'est-à-dire dans un petit volume de terrain à travers lequel va passer le débit pompé, il est nécessaire que la conduction ait une valeur maximale.

L'implantation du forage suppose donc une prospection de ces zones favorables, qui sont, dans les cas qui nous intéressent ici, les fractures du terrain ou mieux les intersections de fractures : il faut découvrir le bon

système de fractures, c'est-à-dire celui capable de propager l'influence dynamique de manière à garantir le débit demandé par l'exploitant. C'est donc un double problème, celui de la conductivité locale, et la nécessité de trouver un système conducteur "branché" sur la réserve, autrement dit étendu sur une aire assez grande et avec une densité de fissures interconnectées suffisante.

Comment peut-on caractériser la réserve liée au forage et à son rythme d'exploitation ? Peut-on en quelque sorte chiffrer le volume d'eau mobilisable par kilomètre carré de terrain ? et si celà est possible peut-on lier cette caractéristique à d'autres caractéristiques d'ordre géologique ou physique observables, pour lesquelles il serait possible de faire un classement, donc d'organiser une prospection et de rapprocher la ressource et les besoins ?

D'une manière pratique, à chaque fonction, conduction ou capacité, va s'attacher un effet de limite sur le débit exploitable de l'ouvrage.

La première limite atteinte sera celle qu'il conviendra de prendre en compte pour ajuster l'exploitation. L'une aura pour origine la conductivité à la périphérie de l'ouvrage et le calcul du débit dans ce cas s'effectuera à partir des observations faites sur pompage d'essai. L'autre traduira la capacité limite du massif intéressé par l'ouvrage, et il s'agira d'un réel problème de détermination de la ressource exploitable.

### *3.6 - Les pompages d'essai*

#### 3.6.1 - Comportement hydrodynamique du milieu sollicité

A l'inverse du milieu poreux, la zone d'influence d'un pompage ne se développe pas de façon centrifuge, mais selon une configuration complexe. La limite d'influence n'est pas une surface "enveloppe" en deça de laquelle la totalité du volume aquifère est influencée, mais pourrait se concevoir comme une surface extrêmement complexe gagnant petit à petit le massif aussi bien latéralement que verticalement et le divisant à tout instant en une multitude de compartiments, certains étant influencés, les autres ne l'étant pas encore. Certes, l'ensemble des compartiments influencés à un instant donné par un essai en régime transitoire reste à l'intérieur d'une courbe enveloppe, mais elle ne représente pas une limite d'influence réelle. Plusieurs mesures de charge, exécutées ponctuellement au sein

de la zone d'influence ne sont pas forcément corrélables. Dans ces conditions, une représentation par carte piézométrique ne s'envisage pas sans précautions.

La synthèse d'une série de mesures ponctuelles au moyen d'une carte suppose un intéressement de la plus grande partie du massif à l'écoulement, de manière à ce que le tracé d'isopièzes continues reflète un écoulement globalement continu au sein du massif. Le lissage inévitable dont l'importance est fonction de l'échelle de représentation choisie doit être justifié par une perméabilité globale du massif, variable de façon continue.

C'est le cas de la figure 4 qui décrit la propagation de l'influence d'un pompage dans un milieu fracturé anisotrope de perméabilité supposée globalement continue. Cette évolution est suivie partiellement, au Nord du point pompé, au moyen de 6 piézomètres. Il est probable qu'en augmentant l'échelle de représentation, on serait amené à tenir compte des discontinuités, et conduit à détailler le massif en zones conductrices influencées et zones non influencées. Vraisemblablement, si l'on multipliait le nombre des ouvrages de surveillance, on s'apercevrait qu'une partie d'entre eux, situés dans les compartiments non influencés, ne réagirait pas. A plus grande échelle, l'amalgame des mesures dans une représentation suggérant un phénomène continu serait inacceptable.

Si toutefois on atteint un régime permanent et à condition de n'avoir que le pompage pour toute influence, les niveaux s'équilibrant, certains points mal connectés sont lentement influencés par l'état d'équilibre et peuvent à la rigueur servir de témoins de cet état : les forages peu productifs peuvent être utilisés comme piézomètres mais uniquement pour observer l'état d'une nappe en régime quasi-permanent.

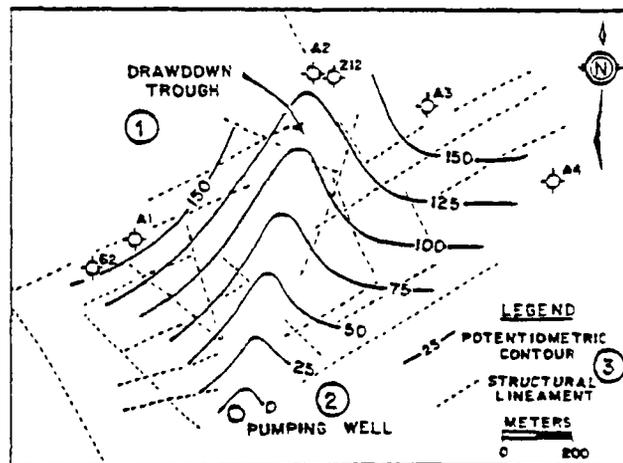


Figure 4 - Exemple d'interpolation pour tracer une surface piézométrique influencée par un pompage en régime transitoire en terrain granitique

(Saanish peninsula - Vancouver CANADA)

(Extrait de Pumping Effects of Wells in Fractured Granitic Terrain)

par A.P. Kohut, J.C. Foweraker, D.A. Johanson, E.H. Tradewell and W.S. Hodge

in : Ground Water, vol. 21, n° 5 p. 572.

- 1) Surface de rabattement
- 2) Surface piézométrique interpolée
- 3) Isopièzes
- 4) Directions structurales

### 3.6.2 - Interprétation des essais

La mauvaise représentativité des ouvrages vis-à-vis du comportement hydraulique du milieu discontinu et le caractère inévitablement sporadique de leurs implantations sont des constantes.

Les ouvrages sont implantés sur les fractures et le plus souvent, il n'existe pour ainsi dire pas de points d'eau entre les fractures.

En ceci tient l'essentiel des difficultés qui se présentent si l'on cherche à évaluer la ressource. Car si la fracture n'est pas elle-même un compartiment à double fonction, à partir d'un essai sur ouvrage, les perméabilités relativement plus fortes distribuées à sa périphérie et l'importance du stock d'eau continue font un "effet d'ombre" sur la reconnaissance des déplacements ténus de l'eau dans des petites fissures.

De la même façon que pour les milieux poreux, les essais sont conduits dans l'une ou l'autre des optiques suivantes :

- caractériser le milieu en chiffrant les paramètres représentatifs, c'est un pompage d'essai s.s.
- définir un débit d'exploitation au moyen d'un essai qui s'apparente à un essai de puits.

Les méthodes d'interprétation de pompage d'essai dont nous disposons laisse supposer que l'on assimile le milieu fissuré à un milieu poreux équivalent de perméabilité non négligeable. Ce milieu est considéré :

- soit comme isotrope mais affecté d'une fissure verticale ou horizontale unique
- soit comme un système à double porosité
- soit purement comme un milieu poreux homogène et isotrope (sans discontinuité)

Ces hypothèses sont simplificatrices et pourtant il n'est pas toujours aisé de choisir l'un de ces modèles et de l'appliquer à un essai réel que l'on doit interpréter.

L'utilisation des résultats pour la prévision d'un débit d'exploitation suppose l'extrapolation au moins sur la durée d'un cycle recharge-étiage. Cela suppose une connaissance suffisante du milieu. Or, on a l'occasion de se rendre compte que certaines discontinuités ou limites - et le milieu n'en manque pas (discontinuités horizontales dans les altérites, discontinuités structurales verticales dans la roche) - ne sont atteintes qu'au bout d'essais longs ; mais la faible capacité du milieu rend l'effet de ces limites essentiel pour la définition d'un débit d'exploitation.

Un modèle conçu pour analyser le rôle de telles discontinuités dans le cadre de la définition d'un débit d'exploitation de petits aquifères mixtes (poreux/fissurés) a été réalisé et exploité au Département EAU pour les besoins de la direction RDM/Jeddah. Il a montré l'importance du dénoyage progressif des horizons altérés et a conduit à la définition d'un mode d'exploitation par contrôle du rabattement et non pas par contrôle du débit. La réponse est certes moins satisfaisante, mais on a vérifié que c'est précisément la meilleure façon de garantir la pérennité d'un débit minimal.

Le choix de la durée de l'essai est délicat et le sera toujours dans la mesure où dans ce type de milieu, on cherche le rôle de discontinuités que l'on ne connaît pas à l'avance, et que l'on ne localise pas. Mais quelques notions simples peuvent être retenues. Il suffit de bien identifier à l'avance le type d'information recherchée. Caractériser la perméabilité du milieu au voisinage de l'ouvrage, donc la productivité du dispositif ouvrage/fracture conductrice, ne nécessite qu'un essai de courte durée. On ne teste ni capacité, ni réserve.

Tester une réserve et définir un débit d'exploitation pour un cycle recharge/étiage nécessite des essais longs : pour un cycle de durée  $t$  pour la pratique, on constate qu'il est satisfaisant de calibrer l'essai sur une durée  $t/10$  : un essai d'un mois, lorsque la recharge une fois l'an est assurée, est suffisant.

Dans certains cas, toutefois on préfère recourir à des pseudo-exploitations de plus longue durée, en particulier lorsque des investissements en aval sont importants. Après un essai de courte durée pour tester la productivité de l'ouvrage, on définit un débit, et l'on met l'ouvrage en exploitation, sans garantie sur ce débit, pendant une période de trois mois, au besoin à un rythme alternatif (une période de pompage, une période de remontée par 24 heures). On effectue soit une soit deux mesures par jour selon le rythme, et en fin d'essai on confirme ou l'on corrige le débit qui avait été proposé à priori. Cette technique a été mise au point par le "Geological Survey Department" de Chypre qui l'utilise désormais couramment. Elle est peu coûteuse - si l'eau peut déjà être utilisée - et les mesures peuvent être faites par l'exploitant lui-même. L'exploitation de ces données est réalisable par les programmes de calcul qui prennent en compte des débits variables (R. Degallier).

#### 4 - PROGRAMME DE RECHERCHES SUR L'HYDROGÉOLOGIE DES MILIEUX FISSURES

En dehors des ouvrages, il n'y a en règle générale, aucune possibilité d'observer directement le cheminement de l'eau dans la partie "non exploitable" du massif. On a donc recours à des moyens indirects presque obligatoirement plus lourds soit en installation soit en interprétation.

Si nous disposons d'un vaste éventail de méthodes d'investigations, ces méthodes sont souvent disproportionnées, c'est-à-dire trop lourdes financièrement et dans leur emploi en comparaison avec la parcimonie de la production attendue d'un captage en milieu de socle.

Le problème est donc à la fois celui d'un savoir-faire, et celui de faire accepter la notion d'un coût financier minimum pour assurer la sécurité d'un approvisionnement ou encore de tirer, d'une expérience lourde et coûteuse, des procédures simplifiées de conduite opérationnelle quotidienne.

Le savoir-faire implique dans l'état actuel de nos connaissances encore un grand nombre de tests, c'est-à-dire le sur-emploi de méthodes d'investigation sur des sites connus, afin d'apprécier les performances et les limites de ces méthodes.

Le programme de recherche actuellement mis en place comprend l'exploitation et le suivi de sites pilotes sous divers climats en milieu de socle.

En Bretagne, un site a été sélectionné. Il est situé sur un système de fractures d'extension, perméables, de direction sub-méridienne. Il est actuellement en cours d'équipement. Des essais comparés de plusieurs méthodes géophysiques sont en cours (VLF, résistivité, max-min.), à maille très fine. Ils vont être suivis de l'exécution de forages en petits diamètres. Cet équipement permettra de suivre avec précision le comportement naturel d'un milieu discontinu sous climat tempéré puis d'observer l'évolution des perturbations provoquées par la mise en exploitation d'un ouvrage, et de sélectionner les moyens d'observation les plus performants d'une part pour la caractérisation de la ressource propre à l'ouvrage, d'autre part pour concevoir l'équipement minimum d'un ouvrage réel afin d'assurer le suivi nécessaire de son exploitation.

Deux autres pilotes sont prévus au Togo avec le triple but de la gestion optimum d'une exploitation, d'une recherche appliquée, et de la formation de chercheurs togolais : l'un des thèmes fera l'objet d'une thèse de doctorat. Le sujet porte sur l'évaluation et la gestion de la ressource en eau en milieu granitique, dans le cadre de l'alimentation en eau potable d'une ville. Le second porte sur la méthodologie de prospection des sites à "forts débits", c'est-à-dire les sites à caractère exceptionnellement favorable sous climat à pluviosité inférieure à 600 mm susceptibles d'être captés, exploités et gérés dans le cadre d'une application à la petite irrigation.

Un autre aspect, celui du cycle de l'eau en milieu discontinu sera abordé par un sujet qui prévoit l'équipement de 100 stations en Haute Volta avec prélèvements et datation des eaux. Parmi ces sites, dix seront sélectionnés pour être équipés et testés par pompage. La pluviosité varie de 400 à 1 100 mm selon la latitude, et l'influence de cette diversité sur le comportement des systèmes hydrogéologiques est l'un des points d'intérêt.

La détermination du bilan des écoulements souterrains à partir de la connaissance du cycle de l'eau est également le thème d'un travail qui prévoit l'équipement d'un bassin pilote sur un massif ophiolithique à Chypre. Télédétection (compositions colorées) et géophysique y seront testées pour identifier les signatures propres à ce type de milieu et apprécier la fiabilité des réponses.

Plus la ressource est maigre, plus il importe de la chiffrer : les moyens financiers ne doivent pas être strictement limités à un pourcentage arbitraire et constant du coût des équipements de fonctionnement.

A défaut, il conviendrait d'admettre une seconde notion qui est une garantie du débit d'exploitation à une incertitude près, ou à un pourcentage près. Cette façon de voir est pratiquement la définition d'un coefficient de sécurité de l'exploitation, sécurité d'autant plus élevée que les moyens techniques dont on se sera doté, auront été adaptés. C'est une vision possible des problèmes de l'alimentation en eau lorsqu'une ressource d'appoint est rapidement mobilisable, mais c'est une vision trop simple si l'eau souterraine est la ressource unique.

\* \*

\*



Thème 2

TECHNIQUES DE PROSPECTION DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU FISSURE

par

P. VAUBOURG

avec l'aide des contributions écrites de

H. PLOTE et J.Y. SCANVIC pour la photogéologie et télédétection

P. BERARD pour la géomorphologie

S. COTTEZ, J. PEIROLO, J. VALENTIN pour la géophysique

C. ARMAND, J.M. BARRAT, S. PUYOO, H. PLOTE, X. POUL pour les travaux de forage

F. BEL, H. BONIN, R. DOMINICI, H. PLOTE, M. RICOLVI, J.L. SCHNEIDER  
pour les études générales



La méthodologie, maintenant bien classique et suivie dans le cadre de recherches d'eau en milieu aquifère discontinu, comporte quatre phases successives :

- une étude documentaire pour analyser les données existantes

- l'examen des photographies aériennes permettant de repérer tous les linéaments susceptibles de révéler un réseau de fractures et les critères morphologiques constituant des indices hydrogéologiques

- la localisation au sol des linéaments. Cette phase n'est pas toujours facile et des erreurs de la dizaine de mètres, voire plus, dans le report des observations sur le terrain sont tout à fait possibles.

- la géophysique enfin dont le rôle est de :

- . confirmer ou infirmer les conclusions de la photo-interprétation et notamment celles concernant la fracturation

- . rechercher les zones de fractures, de contact dans les secteurs où la géologie de surface fournit peu d'indications

- . donner sur le terrain la position précise des fractures et de leurs points d'intersection et fixer l'implantation au sol du forage

- . en l'absence d'anomalie géophysique, d'éviter un échec probable

- . en cas d'échec, préciser la situation des sites favorables dans certains villages afin de résoudre le problème local.

Si le contexte est favorable on passe à l'exécution des ouvrages puis à la mise en production.

Les communications présentées dans le cadre du séminaire traitent essentiellement des points suivants :

- photo-interprétation et télédétection
- études géomorphologiques pour le repérage des accidents au sol
- méthodes géophysiques
- amélioration du débit des ouvrages peu productifs par développement
- traitement informatique statistique des résultats d'une campagne de forages.

### *1 - PHOTO-INTERPRETATION ET TELEDETECTION*

La photographie est un outil de travail fondamental pour l'hydrogéologue, notamment en zones de socle, géologiquement beaucoup moins bien connues que les vastes ensembles sédimentaires. Les photos sont à examiner avant, pendant, mais aussi, après, l'exécution des travaux :

- Avant : en l'absence de cartes topographiques à grande échelle on vérifie les accès, on choisit les itinéraires de reconnaissance, on prépare l'inventaire des points d'eau. Cette phase constitue un document de base.

En l'absence de cartes géologiques, on identifie les séries et les structures en liaison avec les recherches hydrogéologiques ; on délimite les unités géomorphologiques, le réseau hydrographique, le maillage structural.

Les différents types de linéations observées sont associées

. à la végétation : limites de bois, de forêts, de champs, de feux de brousse, alignement d'arbustes ;

- . au réseau hydrographique en attachant une grande importance aux marigots secondaires situés sur les glacis dénudés, aux différents types de maillages ;
- . aux formes du relief : cuestas, collines, filons ;
- . à la nature et à la texture des formations : schistosité, foliation, linéations, directions et pendages des séries ;
- . aux discontinuités pétrographiques et structurales : limites de formations, filons, diaclases, joints, failles, décrochements, zones broyées ou mylonitisées.

La subjectivité des reports linéamentaires doit être corrigée par les connaissances de la morphogénèse et des contraintes tectoniques régionales.

- Pendant : les vérifications et les contrôles de terrain complètent et affinent l'interprétation : nature des formations, textures, structures, compléments d'inventaire.

- Après : l'analyse des résultats permet de vérifier, en cas d'échec comme de succès, lesquels des facteurs lithologiques, géomorphologiques ou structuraux ont été les plus déterminants.

Dans le contexte de l'hydraulique villageoise, cette démarche traditionnelle doit être suivie pour la recherche de débits de 0,5 à 1,5 m<sup>3</sup>/h pour l'obtention de débits supérieurs destinés à l'alimentation de centres secondaires ou de villes, l'apport de techniques complémentaires est alors nécessaire pour compléter les études par photo-interprétation traditionnelle : télédétection notamment.

A partir de l'expérience acquise au cours de ces dernières années, il est possible de préciser certains points pour lesquels la télédétection multi-spectrale spatiale apporte ou peut apporter une contribution appréciable à

l'avancement des études hydrogéologiques :

- inventaire des discontinuités des aquifères profonds
- analyse structurale régionale
- analyse physiographique d'un bassin versant
- recherche de zones hydromorphes, de sources
- analyse de la biomasse et de son évolution.

Une application a été faite sur des terrains du bouclier d'Arabie pour lesquels on possédait une "vérité-terrain". Il s'agit de dérivées "noir et blanc", adaptées à la définition du réseau de fractures et d'un étalement dynamique après filtrage du canal proche infra-rouge, orienté vers la recherche des indices d'eau. L'utilisation des dérivées permet de tracer directement des cartes de réseau de fractures et linéaments en zone de socle affleurant.

Le traitement coloré mis au point a d'abord conduit à constater que dans l'environnement étudié, les formations détritiques signalées par des couleurs claires sont liées à une présence récente de l'eau ou, en d'autres termes, à une présence répétée de l'eau. Qu'il s'agisse des silts fraîchement déposés sans patine ni reprise d'altération, d'incrustation de sel à la surface, tantôt très ténue, qui assure juste une cohésion entre les fines, tantôt abondantes (khabras), on relève chaque fois à l'origine une présence d'eau, soit eau de surface, soit eau d'imbibition, qui engendre une évaporation. Toutes ces formations se signent dans la gamme des rouges (du blanc au rouge clair), contrastant sur un fond coloré dans le bleu vert.

Il existe deux autres techniques de télédétection dont les développements spatiaux et aériens ont montré le caractère prometteur : l'infra-rouge thermique et le radar latéral. Pourtant au niveau des applications, on constate en ce qui les concerne un relatif sous-développement que l'on peut expliquer par l'absence de données présentant le caractère d'universalité des images LANDSAT.

Il a été mis en évidence, sur les images thermiques spatiales, l'existence de plages de température de nature pérenne, très localisées, de forme bien définie et stables dans le temps. Les recherches entreprises pour expliquer ces phénomènes ont montré qu'ils n'étaient pas associés à des reliefs, à de la

végétation, à une différenciation lithologique ou à des problèmes climatiques. Deux hypothèses séduisantes sont donc avancées avec prudence : l'une concerne les nappes d'eau superficielles, l'autre le flux géothermique dont les anomalies pourraient se manifester en surface grâce à des variations de la conductivité thermique dans un même milieu.

Les radars latéraux utilisent la propriété de rétro-diffusion que possèdent les hyperfréquences lorsqu'elles sont émises en direction de la surface de la terre. Ils permettent ainsi la restitution sous forme d'images du signal rétro-diffusé qu'ils enregistrent. Ce signal est influencé par :

- la rugosité de surface des objets et matériaux,
- la constante diélectrique propre à ces objets et matériaux et qui varie en fonction de leur contenu en eau.

Jusqu'à présent les couvertures radar régulières ont été réalisées par avion, principalement au-dessus des régions de forêt équatoriale où la forte nébulosité tout au long de l'année n'avait pas permis d'obtenir de bonnes photographiques aériennes. C'est donc la caractéristique "acquisition tout temps" qui a prélué au choix de la télédétection par micro-ondes.

A l'expérience, il apparaît que les radargraphies sont un bon substitut des photographies aériennes. Elles permettent d'interpréter des informations concernant principalement :

- la morphologie perçue grâce aux différenciations de textures et à l'effet de relief qui les accentue. Parmi les détails morphologiques mis en évidence, les linéaments sont certainement les plus intéressants dans le domaine de l'hydrogéologie,

- la pénétration qui permet d'observer certains ensembles géologiques masqués par un faible recouvrement superficiel.

## 2 - ETUDES GEOMORPHOLOGIQUES

Les unités géomorphologiques fournissent des indications hydrogéologiques fondamentales en liaison avec les différents types de modelés, avec l'allure générale du réseau hydrographique, la nature lithologique et le degré d'altération des formations du substratum.

En Haute-Volta, par exemple on distingue classiquement les modelés suivants.

. Le modelé latéritique, le plus représentatif des régions soudano-sahéliennes, résulte des processus d'altération, de cuirassement et d'érosion qui se sont succédés aux époques récentes sous la dépendance des variations paléoclimatiques caractérisées par l'alternance des épisodes pluvieux et des périodes de sécheresse.

L'étagement et l'emboîtement des cuirasses et des carapaces ont fossilisé de vastes glacis d'épandage dont il ne reste que quelques témoins. Les "latérites": cuirasses et carapaces, protègent de l'érosion des altérites sous-jacentes. Elles masquent cependant la nature du substratum et le tracé des structures profondes. Le réseau hydrographique sera donc souvent indépendant de ces structures, très rarement incisé, le plus souvent arrondi.

. Le modelé des régions granitiques sera caractérisé par une platitude monotone avec des placages sableux et gravillonnaires sur les versants et glacis, des bas fonds largement remblayés. Le profil-type d'altération des formations à texture grenue comprend au-dessus de la roche saine : la roche fissurée, fracturée et décomprimée, siège des circulations d'eau, à fonction productrice. L'arène grenue ou zone d'altération "sableuse" à fonction capacitive ; l'arène argileuse ou zone d'altération kaolinique. Ce profil tronqué et érodé aboutit à la formation de blocs épars, de domes isolés, d'inselbergs, de collines chaotiques. Le réseau hydrographique est souvent maillé et hexagonal sur les glacis et versants, anastomosé et arrondi sur les plateaux.

. Le modelé des régions schisteuses est beaucoup plus varié, incisé, déchiqueté. La schistosité verticale et les formations filoniennes marquent

très nettement leur empreinte dans le paysage avec des formes aigües, isolées et allongées. Le réseau hydrographique très dense est incrusté et parallèle aux structures qu'il souligne.

. Le modelé des régions amphiboliques, regroupant les roches vertes ou noires monominérales, est représenté par des collines arrondies, groupées et relativement élevées dans le paysage. L'altération essentiellement argileuse surmonte sans transitions la roche saine.

Après avoir caractérisé le modelé sur photo-aériennes et sur le terrain, il est alors possible de dresser une esquisse géomorphologique et géologique sur laquelle apparaîtront :

- les zones d'affleurement
- les secteurs sub-affleurants
- les zones à altération supposée épaisse.

C'est vers ces dernières, susceptibles de constituer les meilleurs réservoirs, que devront être orientées les recherches ultérieures basées sur l'analyse des linéations photogéologiques en relation avec les observations structurales et la fracturation.

Il a été vérifié que la distribution des marigots constitue un excellent guide pour placer un forage sur une fracture principale, ou mieux sur une intersection de deux ou plusieurs fractures.

- Lorsqu'ils sont constitués de segments rectilignes, les marigots soulignent en surface la trace des fractures majeures du socle ; leurs confluent correspondent donc à des noeuds de linéaments : ce sont des zones très favorables. L'expérience montre que les chances de succès sont d'autant plus élevées que le lit des marigots est large, à faible pente, peu encaissé et limité par un talus vertical (les berges à arrondi convexe sont généralement peu favorables).

- Les plateaux légèrement vallonnés, peu ou pas latérisés et présentant des formes arrondies à faible rayon de courbure sont des zones défavorables ;

les implantations positionnées à l'intersection des dépressions séparant les dômes montrent un pourcentage élevé d'échecs.

- Sur les plateaux tabulaires, bien latéritisés, on remarque des rigoles ou gouttières de profondeur maximale de l'ordre du mètre. Sur les bords de ces gouttières, les dalles latéritiques sont souvent dénudées et légèrement démantelées ou même basculées. Le croisement de deux de ces gouttières engendre une dépression peu profonde (1 m) du plateau. Les forages, implantés au centre de ces dépressions; donnent de très bon résultats.

En résumé, implanter un forage consiste à rechercher un site où :

- l'épaisseur d'altération est maximale
- le contact socle/altération, zone de fissuration maximale, est situé largement au-dessous du niveau statique régional
- les fractures sont positionnées de façon précise sur le terrain par le réseau hydrographique ou par les dépressions des plateaux
- la lithologie est la plus favorable.

### 3 - LES ETUDES GEOPHYSIQUES

#### 3.1 - GENERALITES SUR LA LOCALISATION AU SOL DES LINEAMENTS PAR LES METHODES GEOPHYSIQUES

D'un point de vue théorique, il peut être fait appel à plusieurs méthodes géophysiques. On peut les classer en fonction des paramètres dont elles permettent la mesure :

- vitesse de propagation des ondes (V)
- densité (d)
- résistivité ( $\rho_a$ )

Ces trois paramètres présentent en effet, des contrastes de valeur selon que l'on a à faire à des formations saines ou altérées, fissurées ou fracturées. D'une manière générale, la présence de fractures fait baisser la résistivité, la vitesse des ondes et la densité.

Les roches ultra-basiques et plutoniques basiques présentent une forte susceptibilité magnétique par rapport aux roches acides (grès, quartzites) et aux roches sédimentaires. Cette propriété naturelle peut être exploitée lorsque l'on recherche des intrusions basiques telles que les dolérites dont la mise en place entraîne une fissuration dans les roches encaissantes.

Au plan pratique, la (ou les) méthode employée doit répondre à un cahier des charges dont les clauses sont dictées par la réalisation dans de bonnes conditions des campagnes d'aménagement hydraulique. Il est en particulier demandé à la géophysique d'être :

- efficace au niveau de la réalisation des mesures et de leur interprétation
- rapide et simple de mise en oeuvre
- adaptée à l'échelle de reconnaissance requise (décamétrique à hectométrique)
- apte à bien différencier la succession lithologique la plus fréquemment rencontrée, notamment lorsqu'elle est fracturée.

De nombreuses méthodes d'investigation géophysiques sont disponibles mais toutes ne présentent pas l'ensemble des qualités souhaitées (encart 1 et fig.1).

En hydraulique villageoise, la géophysique est employée dans 25 % des cas environ et est réservée aux implantations jugées difficiles.

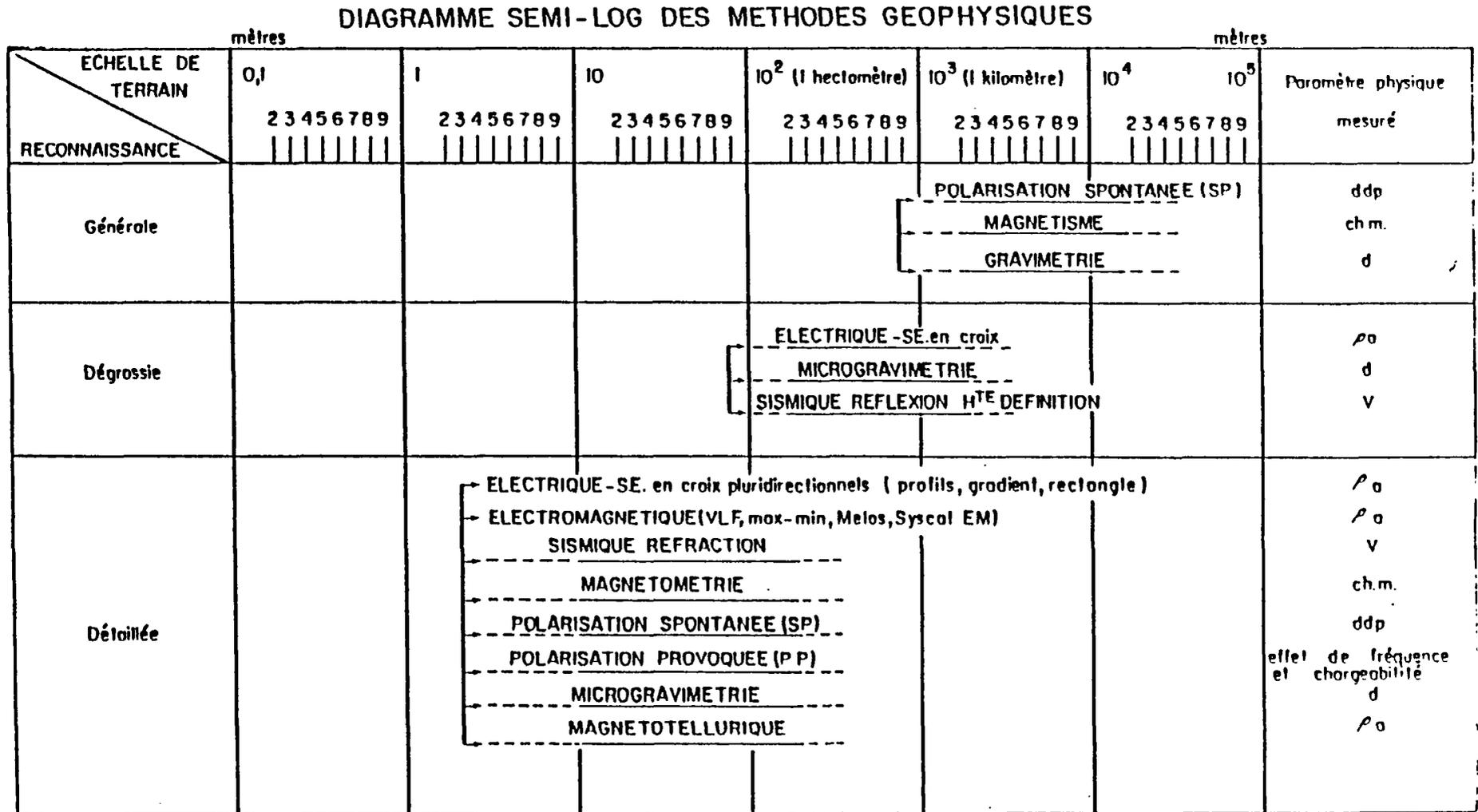
Encart 1

- Les méthodes sismiques, utilisées pour étudier la propagation d'ondes résultant d'un ébranlement artificiel du sol produit soit mécaniquement, soit par une explosion, nécessitent un matériel complexe et assez coûteux comportant des sismographes (géophones) et un système d'enregistrement. Leur mise en oeuvre avec l'emploi d'explosifs est délicate et pose de nombreux problèmes de sécurité. La profondeur d'investigation par ébranlement artificiel est, par ailleurs, limitée à 10-20 m. La vitesse d'exécution est faible et l'interprétation est assez lourde.
- Les méthodes gravimétriques permettent de définir la distribution des densités dans le sous-sol. Les mesures sont relativement faciles à réaliser, mais elles exigent par contre, pour pouvoir être interprétées, de nombreuses corrections notamment d'altitude, de latitude et topographique. Ceci implique la présence d'une équipe de topographie. Enfin, le traitement des données demande des moyens informatiques peu compatibles avec la rapidité d'exécution demandée.
- La polarisation spontanée est la mesure de phénomènes électriques naturels liés à l'électrofiltration. Ces phénomènes n'existent pas toujours et sont assez difficiles à mettre en évidence particulièrement en zone aride.

Les fissures constituent un milieu conducteur dans un ensemble sain résistant et sont, de ce fait, polarisables et peuvent être détectées par les méthodes de polarisation provoquée. Ces méthodes impliquent une charge électrique du milieu conducteur et nécessitent des sources d'envoi de courant importantes. Le matériel est lourd et délicat.

- La magnétotellurique consiste à mesurer les champs magnétiques et électriques naturels concordant à différentes fréquences. Si l'enregistrement des données est aisé, il n'en est pas de même de leur traitement qui nécessite des moyens informatiques importants.
- L'électromagnétisme est une méthode qui s'est fortement développée au cours des 20 dernières années, essentiellement dans le domaine de la recherche minière où les amas sulfurés recherchés sont particulièrement conducteurs. Leur application en milieu fissuré aquifère a été, jusqu'à présent, limitée du fait des résultats intéressants obtenus par les méthodes électriques classiques.
- La magnétométrie est essentiellement utilisée pour la recherche des contacts entre roches vertes pour la plupart magnétiques et leur encaissement. Il s'agit là d'un cas particulier de milieu fissuré. C'est une méthode légère.
- Les méthodes électriques, légères à mettre en oeuvre, offrent en un seul équipement la possibilité d'une reconnaissance verticale et latérale. D'un coût faible et d'interprétation aisée, les méthodes électriques se sont révélées jusqu'à présent parmi les mieux adaptées aux problèmes à traiter.

Figure 1



d: densité

ρ<sub>a</sub>: résistivité apparente

v: vitesse des ondes

ddp: différence de potentiel

ch.m.: champ magnétique

Encart 2

ELECTROMAGNETISME

Objectif : Déterminer la répartition des résistivités dans le sous-sol.

Principe : Les formations soumises à un champ électromagnétique primaire produit par un courant alternatif envoyé dans le sol, soit directement soit par induction, sont parcourues par un courant induit qui engendre à son tour un champ électromagnétique secondaire (champs électrique et magnétique).

Mesures : Elles portent sur le courant induit soit par ses effets sur le champ magnétique total soit directement sur le champ électrique.

Caractéristiques des champs mesurées :

- composantes horizontale et verticale du champ magnétique, son amplitude, son déphasage ou son inclusion par rapport au champ primaire

- composante horizontale du champ électrique.

Les composantes des champs électrique et magnétique permettent un calcul des résistivités.

METHODES : - le VLF (Very Low Frequency), qui utilise les ondes radios de stations émettrices puissantes souvent très éloignées.

(fréquences 15 à 25 KZ)

- le MAX-MIN système multifréquentiel à émetteur-récepteur mobiles (fréquences 200 à 3800 HZ).

PROFONDEUR D'INVESTIGATION : Elle est fonction de :

- la distance -d- émetteur-récepteur (approx. 0,5 à 1,5 d)

- la fréquence du courant inducteur (ex. V.L.F. < à 40 m).

### 3.2 - LES METHODES ELECTROMAGNETIQUES

Les premiers exemples d'application des méthodes électromagnétiques à l'hydrogéologie des milieux fissurés ont été présentés au cours du séminaire.

Leurs principes et limites d'application sont résumés dans l'encart 2.

Le VLF a été employé dans différents contextes géologiques :

- au Sénégal, en terrain métamorphique
- en Haute-Volta, en milieu granitique
- en Arabie Saoudite, dans des séries volcano-sédimentaires situées sous 5 m de recouvrement alluvionnaire. Les paramètres mesurés ont été :

- .  $\theta$  angle d'inclinaison du grande axe de l'ellipse de polarisation
- .  $\phi$  déphasage entre la composante radiale du champ magnétique et la composante horizontale du champ électrique.

Ces premières expériences montrent que le VLF offre des avantages de mise en oeuvre : appareillage léger, 1 seul opérateur en mode inclinaison, 3 en mode résistivité, progression facilitée par l'absence de fil (trainé) et de piquetage (en mode inclinaison). Par contre l'opérateur n'est pas maître de la "profondeur d'investigation" (fréquence imposée pour le VLF) avec parfois des problèmes de dépendance aux stations émettrices (réception, horaires, orientation).

Comme pour les méthodes électriques, les anomalies magnétiques sont liées aux structures conductrices ou résistantes du sous-sol. Mais les méthodes magnétiques sont plus sensibles aux contrastes de résistivités des formations qu'à leur valeur absolue de résistivité, Ceci qui explique que, en profil transversal, on obtient une bonne précision géométrique mais peu d'information

sur la résistivité des formations donc sur leur nature lithologique. Par ailleurs bien que la profondeur d'investigation soit en principe directement liée à la longueur d'onde d'émission et à la résistivité des terrains, la présence de structures conductrices près de la surface du sol influence fortement le champ résultant qui devient alors difficile à maîtriser.

Le profil VLF, comme le trainé électrique d'ailleurs, n'est réellement interprétable qu'avec des sondages électriques ou des forages de reconnaissance. Les sondages électriques doivent venir suppléer et compléter le VLF pour lever les indéterminations lithologiques au droit des anomalies repérées. Enfin il serait certainement intéressant de doubler les profils avec des mesures VLF en mode résistivité pour déterminer si le V.L.F. peut être utilisé indépendamment d'autres méthodes géophysiques.

#### *4 - PREVISION DU DEBIT DES FORAGES PEU PRODUCTIFS APRES DEVELOPPEMENT A L'AIR*

Il a été montré statistiquement qu'un développement soigneux comprenant des alternances de phases de pompage à l'émulsion et de remontées de niveau peut permettre d'équiper certains forages dont le débit du soufflage était insuffisant. Pour cela l'hydrogéologue doit prendre en compte le contexte géologique et les données statistiques mais il doit pouvoir aussi être à même de fixer les différents paramètres du développement.

Il y aurait d'autres moyens pour améliorer les débits, notamment la fracturation hydraulique. Cette technique permettrait avec des pressions relativement faibles d'augmenter l'ouverture des fractures et de mettre en communication l'ouvrage avec des fractures situées dans son environnement proche. Mais actuellement les moyens pour la mettre en oeuvre ne sont pas disponibles sur les ateliers des Entreprises.

En Haute-Volta par exemple il a été constaté que le développement est surtout efficace au-dessous de  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  et jusqu'à  $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .

. Au-dessus de 3,5 m<sup>3</sup>/h, le gain de débit est très faible ou nul ; les venues d'eau sont suffisantes pour que le développement se fasse de lui-même durant les périodes de soufflage en cours de foration par décoïmatage et lavage des fissures. Des économies notables peuvent alors être réalisées sur le montant du développement.

. Au-dessus de 10 m<sup>3</sup>/h, le débit obtenu à l'air-lift devient inférieur à celui du soufflage. C'est la conséquence de la géométrie du système d'air-lift et en particulier du diamètre limité du flexible d'exhaure et de la hauteur parfois limitée de la tranche d'eau sous le niveau dynamique.

Comme on pouvait le supposer, plus la formation géologique contient de fraction argileuse colmatante, plus le gain de débit dû au développement est important.

Les granites anciens, les roches basiques à altération argileuse et surtout les schistes donnent des résultats parfois spectaculaires en cas de faibles débits (gain de débit maximal de 488 % pour un forage dans des schistes sériciteux après 6 x 30' d'air-lift et 6 x 40' de remontée du niveau).

Pour ces trois formations géologiques il y a plus de 75 % de chances d'observer un accroissement de débit de 20 % après le développement, dans la gamme de débits de 0,5 à 1 m<sup>3</sup>/h.

Dans le cas précis des schistes, il y a 75 % de chances d'observer un accroissement de 50 % ou plus du débit, et plusieurs forages donnant 0,5 m<sup>3</sup>/h au soufflage ont été équipés. Leur débit, après développement, s'est révélé nettement supérieur au minimum fixé à 0,7 m<sup>3</sup>/h pour un forage considéré comme positif.

Dans le cas des roches compactes et peu altérées (granites récents, ou certaines migmatites par exemple), il ne faut pas attendre d'accroissement sensible du débit après développement. Au contraire, celui-ci met souvent en évidence des phénomènes de limites qui conduisent à un débit exploitable nettement inférieur au débit du soufflage (10 % de réduction en moyenne dans la gamme 1,5 à 2 m<sup>3</sup>/h ; une réduction de 28 % a même été observée dans des granites tardi-tectoniques).

## 5 - TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES D'UNE CAMPAGNE D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE

Au Niger, une approche synthétique, par traitement informatique, des connaissances géologiques et hydrogéologiques acquises au cours du "Projet 1000 forages" a fait l'objet d'une présentation intéressante et prometteuse.

Le traitement des données recueillies a été réalisé au moyen du programme FIESTA. Ce programme permet le tri, le classement, la combinaison et l'analyse des données collectées sur le terrain.

Les résultats sont présentés sous forme de cartes, de graphiques et de diagrammes avec des différenciations zonéographiques fondées sur la géologie et la géomorphologie.

Le traitement de l'ensemble des données d'une campagne peut se concrétiser par des cartes d'orientation de travaux de campagnes futures.

La décision a été prise, au cours de ce séminaire, d'effectuer une mise au point d'un dispositif d'acquisition et de stockage sur cassette des données, sur le terrain et d'élaborer un logiciel permettant le transfert rapide de ces données sur l'ordinateur VAX du Centre Scientifique d'Orléans, qui permettra l'emploi du programme FIESTA (1), pendant les phases de rédaction des rapports.

\* \*  
\*

---

(1) Ph. CROCHET - D. FOHLEN - J.M. BARRAT. La chaîne HIVI, Système et Programmes micro-informatiques appliqués aux Projets d'Hydraulique Villageoise. Rapport BRGM 83 SGN 748 EAU.

Thème 3

ANALYSE DES BESOINS ET DU MARCHE  
Présentation des offres et montage des projets

par

M. LE NIR

avec l'aide des contributions écrites de D. FOLHEN, H. MOUSSU,  
H. PLOTE et les intervenants du séminaire



L'importance prise par les programmes d'hydraulique villageoise dans les marchés à l'exportation du secteur "Aménagement" du B.R.G.M. justifiait une analyse du phénomène en terme d'évolution et de pérennité de ce type de marché.

A partir des nombreuses contributions et questions qui ont marqué la matinée du 8 septembre consacrée à ce thème, trois catégories de préoccupations ont pu être cernées :

- \* un besoin d'information des chefs de projet et ingénieurs isolés sur leur projet qui désiraient avoir une vision plus large sur le développement de cette activité,
- \* le besoin, ressenti par beaucoup, de mieux connaître les multiples organismes de financement susceptibles de participer à ces projets,
- \* la nécessité d'élargir les caractéristiques techniques des projets actuels réalisés par le B.R.G.M. pour s'adapter à une demande en augmentation mais qui se diversifie avec l'apparition de nouveaux pays souhaitant développer de tels programmes.

\*

\* \*

## 1 - EVOLUTION ET ANALYSE DES BESOINS

### 1.1. PRISE DE CONSCIENCE

La Décennie Internationale de l'Eau et de l'Assainissement, proclamée lors de la Conférence sur l'Eau des Nations Unies à Mar Del Plata en mars 1977, correspondait à l'expression d'une prise de conscience des problèmes de l'eau dans le monde.

La fourniture d'eau en quantité et qualité suffisantes, ainsi qu'une élimination des déchets, ont été considérées comme les conditions essentielles pour obtenir un niveau de développement économique et social raisonnable. D'après la Banque Mondiale, 15 % de la population rurale des P.V.D. avaient, en 1970, accès à l'eau potable et une enquête de l'O.M.S. (1970) précisait déjà que la vitesse de réalisation des projets d'adduction d'eau était dépassée par celle de la croissance démographique.

L'urgence des problèmes de l'eau dans les pays pauvres a conduit à une sensibilisation remarquable des institutions internationales et des pays donateurs et à un intérêt croissant pour les techniques peu coûteuses de distribution et d'assainissement *dans les petites villes et en milieu rural.*

Ces organisations ont infléchi les priorités des gouvernements concernés et l'on constate actuellement un très grand développement des programmes d'aménagement en prise directe avec le milieu rural au détriment des grands projets qui ont parfois déçus.

Cette réorientation suivait en effet une nécessité politique avant même qu'économique : la nécessité de limiter l'exode du monde rural en créant une infrastructure de base suffisamment attractive pour retenir une population rurale en fort accroissement démographique.

### 1.2. TYPES DE PROJETS RETENUS

En ce qui concerne les domaines d'intervention du B.R.G.M., trois grandes catégories de projets ont retenu l'attention des aménageurs : *l'hydraulique villageoise, l'hydraulique pastorale, la petite hydraulique agricole.* Pour ces projets, recherche et définition de la ressource et modes de distribution font de moins en moins l'objet de contrats séparés. Le contrôle de travaux est la règle et l'influence des "aménageurs" augmente face à celle des "inventeurs" de la ressource.

### 1.2.1. L'hydraulique villageoise

Ces programmes consistent en une fourniture d'eau potable essentiellement faite à partir d'eau souterraine. Un classement de ces projets peut être réalisé par type d'ouvrage et moyens d'exhaure.

#### • *Les forages*

Les programmes lancés en Afrique de l'Ouest concernent essentiellement des ouvrages en petits diamètre (forage 6", équipé 4") avec des moyens d'exhaure à motricité humaine.

Cependant, certains projets prévoient des moyens d'exhaure motorisés pour l'obtention de débits plus importants (forage 8", équipé 6").

Ces projets sont actuellement des projets de masse caractérisés par un nombre de forages très important (plusieurs centaines), réalisés dans des délais très courts (1 forage par jour). Ceci a été rendu possible par l'utilisation systématique du forage "marteau-fond-de-trou" permettant des cadences élevées en terrain dur (plus des deux tiers des cas rencontrés).

La compétence du B.R.G.M. pour ce type de projet est reconnue, mais la concurrence devient forte et non sans conséquence sur les marges possibles.

A coté du forage par "marteau fond-de-trou", et particulièrement utilisé au Malawi et au Zimbabwe, il faut citer l'emploi du forage par battage au câble qui est facile à mettre en oeuvre par des sociétés locales (maintenance simplifiée et formation accélérée des foreurs). Les sociétés anglaises ont fait évoluer ce procédé (utilisation de trépons lourds) qui peut être imposé dans un programme. Les sociétés françaises qui ont misé sur la technique du "marteau fond-de-trou" pourront rencontrer dans ces pays un obstacle concurrentiel très sérieux (absence de compétitivité du matériel battage français vis à vis des fabrications anglaises par exemple).

#### • *Les puits*

Les projets d'hydraulique villageoise peuvent revêtir d'autres formes que le B.R.G.M. ne peut ignorer.

Certains pays restent très attachés à la notion de "puits" qui offrent la garantie de l'exhaure traditionnelle en cas de panne de la pompe installée.

Actuellement, les programmes de puits restent une préoccupation locale, tant pour les implantations des ouvrages que pour leur réalisation.

Les sociétés françaises d'ingénierie et de forage s'y intéressent peu en raison du volume de travail fourni par les programmes de forage et par l'absence d'une mécanisation satisfaisante du fonçage des puits. Le marché potentiel est cependant très important (meilleure réponse aux aspirations des usagers, nécessité pour le développement de l'hydraulique pastorale, etc...). Il est indiqué des expériences de fonçage mécanique par procédé BENOTO, mais il reste à résoudre les problèmes d'équipement des ouvrages (réalisation de buses mieux adaptées que les buses actuelles en béton, moins lourdes, moins coûteuses).

#### *Les exhaures motorisées*

Les exhaures motorisées sont réservées, en Afrique de l'Ouest, aux gros bourgs. La tendance actuelle est d'inclure l'étude du réseau d'adduction (qui peut être très sommaire) dans le projet. Les exhaures motorisées sont également la *règle dans certains pays* où les traditions et les infrastructures de maintenance le permettent (Nigéria, Botswana, etc...) avec, par tradition, un réservoir tampon et un réseau d'adduction réduit (parfois limité à quelques bornes fontaines).

Le B.R.G.M. peut trouver dans ce type de projet une diversification de son activité. Il sera nécessaire dans ce cas de s'adjoindre un complément de compétence pour l'étude de la distribution.

En ce qui concerne le développement des programmes d'hydraulique villageoise, on peut noter, à titre indicatif, que les estimations, faites par le C.I.L.L.S. (1981) pour les seuls six états du Sahel francophone d'Afrique, portent sur un total de 44.000 points d'eau à construire auxquels il convient d'ajouter plus de 10.000 ouvrages qui seront à renouveler avant l'an 2000. En considérant l'infrastructure particulièrement faible en points d'eau de l'Afrique Orientale, il est possible d'avancer un besoin minimal immédiat de 60.000 points d'eau pour tout le Sahel tropical.

### 1.2.2. L'hydraulique pastorale

L'amélioration du niveau de vie dans les P.V.D., envisagée par toutes les institutions de développement, entraînera une consommation accrue de viande et ouvrira certainement la voie à une intensification de l'élevage, par un perfectionnement de l'infrastructure hydraulique, l'amélioration du tapis végétal, ou la sélection de races animales mieux adaptées aux ressources botaniques locales.

Les programmes d'hydraulique pastorale sont donc, comme le souligne le document D(80)111 du C.I.L.S.S. (1981) une nécessité immédiate.

Dans de vastes régions pauvres en sols cultivables, hydrauliques villageoise et pastorale seront liées, l'élevage constituant la première activité rurale.

Actuellement, l'obstacle principal au développement de tels programmes semble être de caractère technique : la nécessité d'ouvrages en gros diamètre (type puits) et l'absence de solution satisfaisante pour leur fonçage et leur équipement mécanisé.

Toutefois, le nombre des ouvrages à réaliser en hydraulique pastorale semble moindre (1 100 points d'eau d'ici 1990 en Sahel francophone, et 500 en Afrique orientale d'après l'évaluation C.I.L.S.S., 1977), qu'en hydraulique villageoise. Ces chiffres seront à coup sur à revoir après le lancement des premiers programmes et une meilleure étude des besoins.

Le B.R.G.M. se trouve bien armé pour ce type de projets pour lequel il devra cependant trouver des compétences complémentaires pour mieux cerner les besoins de l'élevage et les caractéristiques de la transhumance des troupeaux pour chaque pays envisagé, avant le choix des implantations des puits.

### 1.2.3. La petite hydraulique agricole

La culture irriguée ne concerne que 20 % des terrains cultivés (culture pluviale 80 %), mais assurent 40 % de la production agricole des P.V.D. (Banque Mondiale, 1982). Par ailleurs, les projets de culture en sec subventionnés ne semblent pas présenter toujours, en Afrique, un intérêt suffisant pour attirer les agriculteurs. L'orientation des projets se fait donc vers un développement de l'irrigation.

Pour les seuls pays du Sahel, la F.A.O. (1982) estime à 2 millions d'hectares le potentiel des terres irrigables contre 263 000 hectares irrigués en 1981, alors que l'autosuffisance alimentaire de la même région nécessiterait seulement 600 000 hectares de terres irriguées.

L'accent est mis sur la solution "*petits périmètres villageois*" comportant des ouvrages simplifiés au maximum et adaptés à une exploitation manuelle ou attelée (exemple Asie). Ces zones concernent pour une bonne part les zones de socle à aquifère de type fissuré avec les difficultés de prévision de débit et de captage évoquées par ailleurs.

Ces projets de petits périmètres villageois ont donc reçu un début de réalisation à partir d'eaux de surface (petits barrages collinaires - SATEC), mais la faible taille des bassins versants et la variabilité des pluies des régions concernées implique la mobilisation conjointe (ou seule) des eaux souterraines.

Devant l'aléa des débits en milieux fissurés, et les incertitudes des ressources exploitables suffisantes, ces projets de petits périmètres irrigués doivent se concevoir comme un prolongement naturel des deux premiers types de programmes, à partir des résultats particulièrement favorables obtenus sur certains forages (exemple en Haute-Volta : 20 % des forages d'Hydraulique Villageoise peuvent fournir plus de 20 m<sup>3</sup>/h).

Ces projets sont très intéressants pour un bureau d'étude, car la réalisation du périmètre irrigué lui-même est un acte spontané de la population auquel il suffit de donner des assurances d'exploitabilité à long terme de la ressource en eau.

### 1.3. IMPORTANCE DU MILIEU FISSURE - CONSEQUENCES SUR LES PROJETS

La part importante des terrains à perméabilité de fissures dans la géologie des différents continents, l'évolution démographique qui oblige à une colonisation des milieux de plus en plus pauvres en ressources que sont les terrains à perméabilité de fissures, contraignent les gouvernements à résoudre les aspects limitant la mise en valeur de ces régions, et en particulier l'alimentation en eau de ces zones.

Ainsi, la majorité des quelque 60 000 points d'eau à construire pour la satisfaction des besoins immédiats du Sahel tropical (cf. § 1.2.1.) est situé en terrain à perméabilité de fissures.

Ce terrain se caractérise par des débits d'exploitation très variables dans l'espace et des mécanismes de renouvellement de la ressource, mal connus qui nécessitent la mise en oeuvre de procédés d'étude et d'exploitation spécifiques.

Alimentation en eau potable et micro-irrigation pour augmenter la productivité des petits exploitants de cultures vivrières semblent être devenus les sujets prioritaires où l'eau souterraine se fera une place à la mesure des ressources qui seront mises en évidence, en raison de leur disponibilité complémentaire vis à vis des eaux de surface (périodes sèches).

L'Inde, le Brésil ont déjà intensifié leur prospection des ressources en eau du milieu fissuré.

#### 1.4. DEVELOPPEMENT DE PROJETS INTEGRES

Il a été remarqué que les projets étaient de plus en plus intégrés. L'aménageur préfère une "fourniture d'eau" pour la satisfaction d'un besoin donné, à un programme en plusieurs étapes : études des ressources, projet d'exploitation, travaux.

Le B.R.G.M., par son intervention très en amont dans les projets de fourniture d'eau (études de localisation et estimation de la ressource), est souvent absent des projets dès qu'il y a réseau d'adduction. Nous sommes au mieux consultés en second par les aménageurs qui recherchent un complément de compétence pour l'étude de la ressource, mais le cas n'est pas général.

Ce sentiment a pu être précisé lors d'une enquête demandée par AGE à DG/MIC en mars 1983. Le travail a consisté à classer les appels d'offres internationaux de 1982 en projets d'approvisionnement en eau qui comportaient tous l'étude de la ressource et se différenciaient par l'existence ou non de la composante "étude du projet d'adduction". Les résultats sont présentés ci-après au tableau 1.

TABLEAU I - RESULTATS DE L'ENQUETE, 1982

	LOCALISATION				FINANCEMENT				
	AFRIQUE FRANCAISE	AFRIQUE ANGLAISE	AFRIQUE PORTUGAISE	ASIE	BAD	FED	BIRD	OPEC	Divers
Alimentation en eau sans adduction d'eau	6	3				4	2		
Alimentation en eau avec adduction d'eau	7	4	1	6	4	1	4	1	1

Malgré toute critique justifiée sur la limite d'interprétation d'une telle enquête très limitée, il est remarquable de constater une proportion importante des projets comprenant l'étude de l'adduction d'eau en sus de l'étude de la ressource.

La grande majorité des offres recensées comprenant l'étude du réseau d'adduction n'étaient pas connues du B.R.G.M.

Cette constatation semble devoir conduire le B.R.G.M. à se doter des moyens d'aller plus à l'aval des projets pour limiter la tendance des aménageurs à posséder leurs propres structures d'évaluation de la ressource en eau. Cette évolution permettra de mieux protéger notre activité de bureau d'étude.

Cet élargissement des compétences vis-à-vis des clients peut être atteint de plusieurs façons : filiales spécialisées, association (locales ou françaises) mieux formalisées vis-à-vis des clients. La pratique actuelle de l'association au coup par coup ne semble pas suffisante pour intervenir efficacement sur cette part du marché.

## 2 - MOYENS DE FINANCEMENT

### 2.1. TYPES DE FINANCEMENT

Beaucoup d'organismes de financement peuvent intervenir sur les projets "Aménagement du monde rural". Ces organismes ont chacun leur caractères propres qui permettent de les regrouper en cinq types essentiels :

- financement sur aide bilatérale (FAC, CCCE, KFW, ACDI, USAID, Japon, Chine),
- financement par des organisations internationales de développement (BIRD, PNUD, UNICEF, UNESCO),
- financement par des fonds de développement (fonds arabes, STABEX, FAD, FED),
- financement par des banques spécialisées dans l'aide (CCCE, BADEA, BAD, CITIBANK, BID),
- financement national par les Etats.

La limite entre les différents types de financements est extrêmement fluctuante ; on peut énoncer trois raisons principales :

1. De plus en plus, les financements sont réalisés conjointement entre plusieurs bailleurs de fonds (cofinancement, multiparticipation) d'où un chevauchement des différents types énoncés.
2. Selon les sollicitations des états demandeurs et en fonction des possibilités des organismes de financement, des aménagements techniques financiers apparaissent souvent afin de satisfaire aux programmes jugés indispensables et urgents.
3. Quel que soit le type de financement, la séparation entre la partie de l'aide allouée sous forme de prêt et l'autre partie en tant que don fait l'objet de négociations modifiant souvent le type initial du financement.

### 2.1.1. Financement sur aide bilatérale

Ils s'agit d'accords de financements réalisés directement entre le pays bénéficiaire et les pays donateurs. Les principaux exemples de pays réalisant ce type d'aide sont :

- FRANCE           Fonds d'Aide et de Coopération (FAC)
- ALLEMAGNE       Banque allemande de Reconstruction (KFW)  
                      Société allemande de développement (DEG)
- CANADA           Agence Canadienne de Développement International (ACDI)
- U.S.A.            Agence Internationale de Développement (USAID)
- JAPON et CHINE POPULAIRE.

La mise à disposition de ces sommes fait l'objet d'une planification très précise lors des réunions de commissions mixtes (prêteur et demandeur) chargées d'évaluer et de répartir les financements octroyés.

Hormis quelques cas particuliers, ces aides bilatérales reviennent aux exportateurs de services et d'équipements du pays prêteur. Ainsi, en ce qui nous concerne, le FAC reste la source unique d'études financées sur aide bilatérale française, en association depuis quelques années avec la CCCE, qui se substitue alors au FAC dans son rôle.

Au Sénégal, le programme d'hydraulique villageoise Nord Sénégal a été réalisé (1980-1983) avec l'aide bilatérale mise en place par le FAC (20 %) et la CCCE (80 %) (montant global 400 MF CFA = 8 MFF).

En Mauritanie, la dernière modélisation de la nappe de Boulanouar a été réalisée sur un crédit FAC.

### 2.1.2. Financement par des organisations internationales de développement

Au sein d'organismes comme la Banque Mondiale ou les Nations Unies, une stricte sélection des projets s'opère selon les objectifs et les priorités définies par les assemblées générales de ces organisations internationales. Les fonds octroyés sont mis à la disposition des pays après définition exacte du projet entre l'organisation et le pays receveur.

L'intervention de bureaux d'étude dépend uniquement des critères de réalisation et d'efficacité retenus lors de la phase de conception du projet.

Souvent, ces organismes disposent de leurs propres experts et utilisent les moyens de l'administration, mais il peut être fait appel à une intervention extérieure (consultants, entreprises...). Ils ont néanmoins une orientation très nette vers la mise en place de structures nationales (équipement, encadrement) pour réaliser des travaux selon un calendrier très lâche.

De plus en plus, ces financements sont orientés vers des projets intégrés, mais face aux besoins croissants des Etats, il y a souvent cofinancement avec les fonds d'aide (Koweït, Arabie, OPEP).

En Mauritanie comme au Sénégal, ce type de financement reste très souvent une affaire purement interne entre l'administration et l'organisation.

Durant la dernière décennie, ces financements ont permis, en Mauritanie la réalisation de puits par les brigades de la Direction de l'Hydraulique (BIRD, UNICEF et PNUD) ; il en est de même pour le Sénégal (PNUD, UNICEF et BIRD-AID).

### 2.1.3. Financement par des fonds de développement

On distinguera trois cas possibles selon le bailleur de fonds :

#### \* *Fonds Européen de Développement (FED)*

Son intervention est liée à une planification de l'aide par pays, régie selon la convention ACP de Lomé (Accord CEE-Afrique-Caraïbes et Pacifique).

L'aide mise en place fait appel à l'intervention de sociétés de services ou de biens d'équipements, membres de la CEE. Pour les services, ceci se fait selon des quotas précis mis en place afin de traiter également toutes les sociétés européennes intéressées.

Le cadre des financements FED est très strict, donc souvent peu adapté au contexte actuel des projets, sauf dans le cas où il s'agit d'un cofinancement.

Au Sénégal et en Mauritanie, les crédits FED ont permis la réalisation de puits et de forages au cours des projets "Programme d'Hydraulique Villageoise" dits de la "Première Génération", car limités à la réalisation d'ouvrages (pas de maintenance, ni d'études hydrogéologiques) en très petit nombre (20 ou 30 puits ou forages).

\* *Fonds Arabes, Fonds Africains, Fonds Koweïtien, Fonds Saoudien*

L'intervention des bailleurs de fonds arabes est davantage liée à l'action d'organisations de développement économique régionales telles que la CEAO, le CILSS et le Conseil de l'Entente.

Devant le désir des Etats de réaliser de vastes projets, ces institutions inter-Etats africains se sont appliquées -avec succès mais lenteur- à mobiliser les financements arabes, principalement grâce à la multiparticipation des différents fonds arabes.

La mise en place de ces financements se réalise par la signature d'un protocole tripartite entre le bailleur de fonds, l'organisation régionale initiatrice et l'Etat emprunteur intéressé.

Les financements octroyés sous l'égide d'une organisation africaine représentent une aide non négligeable pour les Etats, avec beaucoup de retombées pour les sociétés de services du fait des garanties exigées par les Fonds Arabes au niveau technique et financier.

Ces types d'aides se caractérisent par des conditions de prêt très avantageuses pour les Etats.

On a pu ainsi mettre en place les vastes programmes d'hydraulique villageoise et pastorale au Sénégal et en Mauritanie grâce au Fonds Koweïtien pour le Développement économique arabe.

Ces programmes d'hydraulique villageoise et pastorale sont caractéristiques des projets de "deuxième génération", avec un nombre élevé d'ouvrages à réaliser (250 puits et forages au Sénégal et 360 en Mauritanie), la construction de stations de pompes importantes (pompes motorisées et solaires) et la mise en place d'une structure de maintenance élaborée.

\* *Fonds d'aide divers (CCCE, STABEX)*

Il s'agit d'organisations de coopérations intervenant le plus souvent comme opérateurs financiers des différents types de financement énoncés aupara-

vant lors de cofinancements importants ; mais ils peuvent aussi intervenir individuellement dans des projets à la demande des Etats ou des organisations internationales.

Ainsi, la CCCE intervient :

- comme fonds d'aide bilatérale en complément du FAC,
- comme fonds de développement économique à la demande des Etats ou des organismes régionaux,
- dans des cofinancements,
- comme fonds de coopération économique à la demande des Etats.

Ce type de financement fait preuve de beaucoup de souplesse, étant très adapté aux besoins des Etats, car agissant sur plusieurs fronts avec des conditions de prêt très avantageuses.

Le STABEX est une caisse de "stabilisation" des cours des matières exportées par les Etats de la Communauté Européenne.

#### 2.1.4. Financement par des banques spécialisées

Ces organismes agissent comme de véritables banques, amenant ainsi un apport non négligeable de capitaux pour la réalisation de vastes projets. Ce type de financement devient de plus en plus le complément indispensable des autres types de financement, car ces banques se spécialisent dans la multiparticipation (cofinancement).

Les conditions de prêt sont souvent beaucoup moins intéressantes que les autres financements.

Ces banques interviennent plus spécifiquement dans des pays réputés stables et présentant une dynamique de développement éprouvée. Le Sénégal en a largement profité, mais ses difficultés actuelles à rembourser peuvent faire craindre des difficultés pour de nouveaux emprunts.

On retiendra surtout la participation de la BADEA au projet CEAO Sénégal, ou de la CITIBANK dans les petits projets de la Banque Mondiale dans ce même pays.

### 2.1.5. Financement national

De petits projets sont réalisés de temps à autre sur le budget des Etats. Le montant de telles opérations est faible, et très souvent les pays ne possèdent pas les fonds pour réaliser ces financements de manière répétée. On retiendra le caractère ponctuel de ces projets, et le peu d'intérêt qu'ils représentent pour nous, car réalisés en régie administrative ou très contraignant quant au transfert des devises.

Par ailleurs, les financements nationaux interviennent en contre-partie de la plupart des projets financés à l'aide des moyens précédents.

## 2.2. EVOLUTION ET ORIENTATION DE CERTAINS ORGANISMES DE FINANCEMENT

Quelques données chiffrées permettent d'apprécier l'intérêt des organismes financiers pour l'aménagement du monde rural.

### 2.2.1. Fonds Arabes

Créés au début des années 1960 et réorganisés en 1973, les fonds arabes étendent leurs interventions tant vers les nations islamiques non arabes que vers les nations non islamiques.

La participation globale des fonds arabes représente environ la moitié (51,5 %) des opérations réalisées de nos jours.

L'aide des Fonds Arabes représente plus du quart du montant des investissements cofinancés. Ainsi, les Fonds Arabes -au sens strict- contribuent à 14,7 % des coûts et la BADEA à 11,2 %, alors que la BIRD se situe à 15 %, les pays industrialisés à 11 % (FAC, CCCE, KFW, ACDI), le FED à 7,4 %, la BAD à 5,1 %, le restant étant de source privée (7,8 %), des contreparties nationales (18,8 % - et d'autres sources (9 %) (sources : Fonds Arabes).

Rapportée à la valeur totale des prêts, l'Afrique représente seulement environ 30 % des prêts engagés, alors que l'Asie reçoit 40 % de l'aide, les Pays arabes 26 %, et l'Amérique latine 4 %. Cette diversification de l'activité géographique des Fonds Arabes n'est pas négligeable ; ainsi, durant la période 1975-1982, 41 nouveaux pays ont fait l'objet de financements, dont 21 en Afrique et 16 en Asie et Océanie.

La plupart des pays cibles retenus dans le programme commercial du B.R.G.M. pour les années 1983-1985 ont déjà fait l'objet de prêts et de dons des Fonds Arabes.

Dans la plupart des cas, les financements arabes dans les pays du Tiers-Monde incluent, outre des prêts à des conditions avantageuses, une part d'apports non négligeable sous forme de dons.

Le financement de services et de travaux concernant l'eau et l'assainissement apparaît en constante augmentation. En 1981, ils représentaient 6,4 % des prêts du Fonds koweïtien contre 3,9 % en 1975 et 2 % en 1970. Pour l'ensemble des sources de financements arabes, le pourcentage est de 13,5 % en 1981, et la BADEA a consacré 2,7 % de ces engagements aux problèmes d'eau et d'assainissement au cours des huit dernières années.

L'aide des Fonds Arabes dans le domaine de l'eau a triplé au cours des dix dernières années. Compte-tenu du nombre de projets en cours de montage à ce jour, on peut estimer que cette tendance ira encore en s'accroissant.

Dans le domaine plus restreint de l'Hydraulique Villageoise en Afrique, l'intervention des financements arabes est très récente (début des années 1980). La sensibilisation des bailleurs de fonds pour de tels projets est due principalement à l'action d'institutions de coopération ou de développement économique. On retiendra principalement :

- le CILSS : Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel,
- le Club du Sahel : issu de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE),
- la CEAO : Communauté Economique de l'Afrique de l'Ouest, avec l'aide du FOSIDEC.

Nos récents contacts avec le FKDEA et le FADES à Koweït nous placent assez bien, et montrent qu'il serait souhaitable de développer ces entretiens en faisant apprécier le rôle d'Ingénieur-Conseil à tous les niveaux, même en amont des requêtes des Etats eux-mêmes (exemple : Soudan).

### 2.2.2. La Banque Mondiale (sources : Banque Mondiale)

En 1982, 54 % des dé-caissements de la Banque ont été attribués à des entreprises extérieures aux pays bénéficiaires des prêts. Cela constitue une forte

diminution par rapport à 1972 (73 %). La part des marchés attribués aux entreprises locales augmente fortement, phénomène qui doit *encourager l'association avec des sociétés locales*.

Les performances françaises auprès de la Banque concernent surtout les domaines des transports (16 %), de l'eau et de l'assainissement (20 %), de l'éducation et de la formation professionnelle (13 %) ; ces performances tendent cependant à diminuer. D'après la Banque elle-même, on assiste, dans les zones d'action traditionnelle de la France (Afrique), à la montée de consultants issus de pays en voie de développement (Inde, Pakistan...), alors qu'il n'y a pas de redéploiement très actif des sociétés françaises vers d'autres régions du monde. En ce qui concerne les secteurs d'intervention, il faut noter qu'un quart des prêts de la Banque s'adresse à l'agriculture (irrigation et drainage) et au développement rural, projets intéressant directement le B.R.G.M.

La Banque donne la priorité à la réhabilitation de ce qui existe, aux projets à rentabilité immédiate.

Suivant les nouvelles orientations, l'agriculture devrait absorber 30 % des ressources de la Banque au cours des années 1980-1990, avec un doublement des interventions en Afrique, et en particulier la zone sub-saharienne. L'intérêt est porté vers une politique agricole réellement incitatrice pour les paysans comme les programmes de petite hydraulique agricole.

90 % des prêts s'adressent aux pays ayant un produit national brut inférieur à 411 \$. On peut noter comme pour les fonds arabes, un intérêt croissant pour les programmes co-financés (23 % du coût total des projets en co-financement). La répartition géographique des prêts est la suivante : Asie du Sud : 24 % ; Asie de l'Est - Pacifique : 21 % ; Amérique Latine : 22 % ; Europe : 18 % ; Afrique de l'Ouest : 8 % ; Afrique de l'Est : 5 % ; divers : 2 %.

### 2.2.3. France : le Fonds de concours et d'Aide et de Coopération (FAC)

Le FAC n'ayant pas d'autonomie particulière ne peut pas être considéré comme une institution financière. Il est par contre l'instrument d'aide au financement des investissements pour vingt-cinq pays d'Afrique (1982) avec lesquels la France a signé des accords de coopération.

TABLEAU II - BANQUE MONDIALE - Exercice 1982 -  
Répartition géographique et sectorielle des prêts  
(doc.Com. n° 124)

	Afrique de l'Est	Afrique de l'Ouest	Asie Est Pacifique	Asie Sud	Europe Moyen Orient Maghreb	Amérique Latine	Totaux sectoriels	Pourcentages sectoriels
Agriculture et Développement rural	177,6	288,9	614,0	813,3	490,1	694,5	3 078,4	23,65
Banques de développement	92,5	19,0	30,0	180,0	356,0	415,8	1 093,3	8,40
Éducation	61,0	19,7	225,6	14,3	93,0	112,8	526,4	4,04
Pétrole - gaz - charbon	30,6	114,0	317,0	9,2	193,5	102,0	766,3	5,99
Énergie	19,0	108,8	271,3	1 295,2	42,5	394,4	2 131,2	16,37
Industrie	9,1	20,0	207,4	383,5	134,1	205,3	959,4	7,37
Ajustement structurel	70,0	150,0	400,0	240,0	304,5	76,2	1 240,7	9,53
Population - Santé	23,0	-	-	-	-	13,0	36,0	0,28
Petites et moyennes entreprises	5,2	16,0	132,0	36,5	70,0	26,0	285,7	2,20
Assistance technique	30,7	26,0	-	7,0	-	8,8	72,5	0,56
Télécommunications	71,7	38,0	142,1	40,0	64,0	40,0	395,8	3,04
Tourisme	-	-	-	-	-	-	-	-
Transports	83,2	115,5	286,0	80,0	397,8	651,7	1 614,2	12,40
Urbanisme	-	61,0	8,0	25,0	74,0	206,8	374,8	2,89
Adductions d'eau - Égoûts	41,0	110,0	90,0	-	159,6	40,6	441,2	3,39
Totaux régionaux	714,6	1 086,9	2 723,4	3 124,0	2 379,1	2 987,9	13 015,9	
Pourcentages régionaux	5,49	8,35	20,92	24,00	18,28	22,96		100

N.B. Tous les montants sont exprimés en U.S. \$

TABLEAU III - Répartition sectorielle en 1982

études générales .....	37,0 millions FF	3,7 %
développement rural .....	288,2	28,9 %
industries, mines .....	94,5	9,5 %
infrastructures .....	190,2	19,1 %
santé, social .....	91,6	9,2 %
enseignement, formation .....	141,4	14,2 %
culture et information .....	56,4	5,7 %
dépenses générales et de contrôle	61,8	6,2 %
transport de l'aide alimentaire ..	35,0	3,5 %
Totaux .....	996,1	100 %

On notera l'importance du développement rural dans le Tableau III.

Le FAC n'est qu'un des moyens d'aide au financement français.

Il faut citer : les protocoles financiers, la Caisse Centrale de Coopération Economique, la Banque française du Commerce extérieur, l'Agence pour la Coopération technique, industrielle et économique (ACTIM). Chaque organisme a ses objectifs et ses contraintes propres (bien résumés par un article de la revue : *Marchés tropicaux* - 24 décembre 1982).

#### 2.2.4. Communauté Européenne

Là aussi, la priorité est donnée au développement des capacités intérieures avec amélioration de l'hydraulique locale et le développement d'infrastructures décentralisées (cf revue "*Actuel Développement*" n° 49/1982).

#### 2.2.5. Conclusions

Sans vouloir, ni pouvoir être exhaustifs, les différents types de financement exposés dans cette note montrent une très forte disparité dans les modes d'intervention des bailleurs de fonds.

Certains financements (aide bilatérale, fonds d'aide divers) agissent dans un cadre limité aux relations demandeur-receveur permettant une mise en place rapide des fonds. Par contre, le financement par des fonds de développement et des banques spécialisées lors de vastes projets en cofinancement nécessite de longs délais du fait des relations complexes issues du tripartisme *Etat - Organisation - Bailleur de Fonds*.

Le montage financier et technique de gros projets suggère une modification de notre approche des organismes de financements, car on s'achemine progressivement vers une lenteur et une complexité croissante du montage des projets où la connaissance des mécanismes propres à chaque bailleur de fond sera primordiale.

Malgré cela, la multiparticipation de bailleurs de fonds représente un immense marché pour notre action dans les prochaines années.

### 3 - EVOLUTION DES TERMES TECHNIQUES DES OFFRES

#### 3.1. PASSAGES OBLIGES

Une évolution certaine des termes techniques des offres est remarquée. Ces caractéristiques nouvelles ont des répercussions sur l'utilisation du personnel du B.R.G.M.

Cette évolution concerne principalement une intégration de plus en plus poussée au pays d'accueil, sous les formes multiples suivantes :

- \* Plus grande importance donnée à l'utilisation et la formation de personnel local sur les projets : entraîne quelques difficultés à faire intervenir certaines catégories de personnel expatrié pourtant disponibles au B.R.G.M.
- \* Réduction du travail réalisé en France et augmentation concomitante des tâches à effectuer localement (rapport, éditions, etc...) : implique une plus grande "transparence" de l'exécution des projets et un contrôle plus étroit par le client.
- \* Examen critique des *curriculum vitae* des expatriés par l'organisme de financement et le client : le choix se portant sur des ingénieurs ayant déjà une certaine expérience technique et outre-mer, il se pose pour le B.R.G.M., un problème d'acquisition de référence pour ses jeunes recrues qui sont acceptées plus difficilement par le client (solution : prise en charge par la formation professionnelle de stages de mise en situation sur des projets à l'étranger ?).
- \* Niveau des prix : les projets d'aménagement du monde rural tel qu'ils sont conçus actuellement sont d'autant plus appréciés qu'ils utilisent des techniques simples, d'où une concurrence progressive d'experts ou de bureaux d'études des PVD étrangers (Brésil, Inde, etc...) ou locaux qui peuvent nous poser des problèmes de niveaux de prix dans les offres ouvertes à la concurrence.
- \* Association avec des sociétés locales : l'obligation d'une meilleure participation des moyens locaux à la réalisation des projets liée aux impératifs de réduction de prix rend de plus en plus attractif l'association avec des sociétés locales.

Tous ces passages obligés doivent être acceptés. Il convient de les utiliser comme autant de moyens de pénétration du pays concerné.

*Ces phénomènes et l'importance du développement des projets en milieu rural rendent compte de la nécessité d'un volume suffisant de ces projets, souvent regardés comme des projets à faible technicité, pour avoir une assise suffisante et avoir le temps de monter des projets plus rares mais à plus haute technicité.*

### 3.2. EVOLUTION DES OUVRAGES

La diversification des pays d'intervention, le développement recherché des marchés annexes de l'hydraulique villageoise (hydrauliques agricole et pastorale) rendra nécessaire une diversification des types d'ouvrages de captage (diamètre des forages, puits) et des méthodes de forage. Les techniques de marteau fond-de-trou en petit diamètre ne peuvent résoudre tous les problèmes et le B.R.G.M. qui a été le précurseur de l'utilisation massive du marteau fond-de-trou en hydraulique doit être le premier à pouvoir proposer la mise en oeuvre d'autres techniques (exemple : fonçage mécanisé des puits pour l'hydraulique pastorale).

## 4 - CONSEQUENCES

### 4.1. L'ACTIVITE

Les projets d'aménagement du monde rural sont une priorité des organismes de financement et des PVD. On note une diminution des grands projets au bénéfice de projets dits "petits périmètres villageois" comportant des ouvrages simplifiés et dirigés vers une utilisation directe par les habitants.

En ce qui concerne le B.R.G.M., son activité doit pouvoir se développer dans trois secteurs : *hydraulique villageoise, hydraulique pastorale, petite hydraulique agricole.*

### 4.2. LES MOYENS

Ne maîtrisant que l'étude de la ressource en eau et ses moyens d'exploitation à l'exclusion des réseaux de mise à disposition de cette eau (exemple : canaux d'irrigation, réseaux d'adduction, etc...), le B.R.G.M. doit se doter des moyens d'aller plus à l'aval des projets pour limiter la tendance des aménageurs à se doter des structures nécessaires propres à l'évaluation de cette ressource. Cet élargissement des compétences qui protégera notre activité de bureau d'étude peut être atteinte de plusieurs façons :

- filiales locales : raisons financières,
- association avec sociétés locales : volonté des états,
- association avec d'autres sociétés : raisons techniques.

### 4.3. LES POSSIBILITES DE FINANCEMENT

Beaucoup d'organismes de financement peuvent intervenir sur les projets cités. Ces organismes ont chacun leurs règles propres de passation de marché qui, pour certains, restent insuffisamment connus. L'ouverture de fait des "marchés protégés" par l'apparition de nouveaux modes de financement nécessite pour le B.R.G.M. la recherche de nouveaux marchés et l'amélioration des contacts avec ces nouveaux bailleurs de fond. Il est à noter que les projets financés sont de plus en plus des projets intégrés et que le B.R.G.M. est le plus souvent court-circuité dès que la partie "aménagement"

devient prépondérante vis-à-vis de la part "étude et exploitation de la ressource".

#### 4.4. LA CONCURRENCE

Les projets d'aménagement du monde rural sont d'autant plus appréciés qu'ils utilisent des techniques simples (exemple : succès des programmes d'hydraulique villageoise avec points d'eau équipés de pompes à énergie humaine).

Cela provoque une concurrence progressive de bureaux d'études de PVD ou locaux qu'il faut accepter et utiliser comme un moyen d'association supplémentaire et de meilleure pénétration des pays visés.

Ainsi, la recherche d'un volume suffisant de ces projets ruraux est-elle nécessaire pour avoir le temps et l'opportunité de monter certains projets à plus haute technicité, mais de fréquence plus rare. Parmi ceux-ci on peut retenir le *recyclage des eaux usées* et les problèmes liés à la *pollution de l'eau*

L'importance donnée à l'utilisation des moyens nationaux (bureaux d'études, personnel, programme de formation) suggère une adaptation de notre présentation sur les offres et le biais d'associations choisies devrait nous permettre d'atteindre l'objectif d'une palette de moyens techniques plus diversifiés (exemple, possibilité d'intervenir systématiquement sur un programme d'adduction).

Par ailleurs un problème sérieux apparaît au niveau de l'acquisition de références pour les jeunes recrues du B.R.G.M., le choix des *curriculum vitae* étant de plus en plus du domaine de compétence du bailleur de fond ou du client. Une formule de stage de mise en situation professionnelle à l'étranger pourrait être une des solutions à mettre en oeuvre.

\*

\* \*

Thème 4

**FORMATION ET TRANSFERT DES CONNAISSANCES**  
**Maintenance des équipements de captage et d'exhaure**

par

**J.C. NAPIAS et G. DUERMAEL**



## INTRODUCTION

Le thème 4 ne correspondait pas seulement à la formation. Il regroupait *maintenance*, *formation*, mais aussi en principe *intégration de Nationaux* à des équipes BRGM ainsi que le *détachement d'agents* du Bureau dans des administrations locales.

La *maintenance* a fait l'objet d'une première discussion tandis qu'une seconde séance de travail a concerné essentiellement la *formation*.

### I - MAINTENANCE (par G. DUERMAEL)

Il apparaît, d'après ce que l'on peut observer dans plusieurs pays africains francophones, que la maintenance des ouvrages d'hydraulique villageois revêt des aspects différents, et diversement performants.

Les grandes notions qui se dégagent des communications (résumées en annexe 2) sont les suivantes :

- Lorsque la maintenance est assurée par un organisme centralisé, l'échec est quasi certain, pour des raisons financières d'abord, puis pour cause de paralysie due aux contraintes administratives.

Une exception : le Togo, mais il faut considérer que la Société d'Entretien jouit d'une véritable autonomie et se trouve dotée de moyens jusqu'ici suffisants. Il faut également noter que l'exiguïté relative du territoire et les moyens d'accès faciles permettent des interventions efficaces... d'autant plus qu'un processus de décentralisation des bases est en cours.

- Par contre, chaque fois que l'on fait appel à la motivation, à la responsabilisation - donc à une prise en charge effective des installations - par les usagers villageois, la maintenance est réalisée d'une manière beaucoup plus efficace.

Une seule restriction, peut-être, concerne la difficulté de faire passer les notions sanitaires, bien que, dans certains cas, des statistiques, réalisées avant et après l'installation du forage avec pompe, fassent apparaître une amélioration sanitaire spectaculaire.

Quoiqu'il en soit, le *choix* ne nous appartient pas, puisque les Etats sont souverains, et qu'ils décident du mode de maintenance.

Les problèmes financiers liés à cette maintenance sont présents - mais il convient de noter que l'exhaure traditionnelle coûtait même souvent plus cher que l'entretien d'une pompe.

\* Y-a-t-il pour le BRGM un rôle à jouer dans l'animation et la formation à la maintenance ?

Bien qu'il y ait assurément un marché potentiel important, le BRGM n'apparaît pas armé en personnel, pour cette mission, et par ailleurs, elle pourrait s'avérer incompatible avec sa position de maître d'oeuvre délégué. Les bailleurs de fonds distinguent bien *contrôle* et *animation*.

Enfin, il apparaît que la formation des responsables locaux incombe, en toute logique, aux constructeurs - installateurs des pompes.

Le problème de l'homogénéité des matériels a été évoqué :

- Est-il plus rationnel pour la maintenance d'utiliser un type de pompe unique ?
- Le danger de monopole existe... de même que celui de voir disparaître l'entreprise qui les fabrique.

En cas de diversification de matériels, il serait souhaitable d'inciter les constructeurs à normaliser un certain nombre de pièces.

La résolution des problèmes financiers ne s'effectuera que par la prise en charge totale par les usagers villageois - y compris l'achat de la pompe (la "pompe-cadeau" est à proscrire).

On voit apparaître, dans certains pays, des comités de villages chargés de collecter les fonds nécessaires pour une caisse d'entretien.

Parfois même, on note la création d'organismes type "Crédit Agricole" qui consentiraient des prêts pour la réalisation des installations et leur entretien.

A N N E X E 1

Résumé des communications relatives à la maintenance

1/ GABON (E. GOACHET)

Une société privée (SOGEC) a mis en place des pompes (VERGNET) et devait en principe en assurer la maintenance.

Elle avait pour cela embauché un technicien togolais compétent. Dans la pratique, ce technicien n'a pu assurer seul la maintenance des ouvrages et n'a pas su/ou n'a pas pu sensibiliser les responsables villageois.

En fait, ce programme aurait nécessité une action de sensibilisation et de formation plus importante.

2/ SENEGAL (J.P. COMTE)

L'auteur présente une réflexion basée sur la connaissance d'un grand nombre de projets (totalisant 4 900 ouvrages) concernant tant l'*hydraulique villageoise* que l'*hydraulique pastorale*.

- . Dans un premier temps, il analyse les causes du *non-fonctionnement* des ouvrages en service (ensablement, pannes mécaniques, manque de financement, puits non terminés).
- . Dans un second temps, il propose des solutions permettant de remédier à cet état de non-fonctionnement :
  - 1) Prévention d'ensablement.
  - 2) Sensibilisation des utilisateurs.
  - 3) Eviter les carences administratives du fait desquelles les ouvrages sont parfois mal exécutés.

Pour ce qui est de l'*hydraulique pastorale*, il s'avère que l'organisation de la maintenance est mal faite (administration trop centralisée) et que, bien souvent les équipements sont mal adaptés, ce qui entraîne un alourdissement des charges qui en fait devraient être réparties entre l'*Etat* et les *utilisateurs*.

### 3/ MALI (G. BRETTE)

Plusieurs projets ont été réalisés au Mali parmi lesquels :  
Helvetas, PNUD, Mali Aqua Viva

La maintenance y est assurée de façon différente selon les projets :

- C'est ainsi que, dans le projet Helvetas, la *maintenance* est *décentralisée*. Il y a eu formation de réparateurs locaux. Les villageois paient les pièces à réparer ou à remplacer.
- Dans le cas du PNUD, par contre, la *maintenance* est *très centralisée*. Le système est basé sur des tournées périodiques à partir de la capitale.

En conclusion, l'auteur insiste sur les conditions nécessaires à une bonne maintenance :

- réparateurs locaux,
- financement réel des frais de maintenance,
- mise en place d'un réseau de distribution de pièces détachées.

### 4/ HAUTE VOLTA (B. SOURISSEAU)

En Haute Volta, à la fin de la décennie, 15 000 forages à pompe manuelle seront installés. Le BRGM contribue pour une grande part à ces installations. Il a pris en compte avec une attention toute particulière les problèmes de maintenance :

- *Présensibilisation* des villageois lors de l'implantation.
- *Sensibilisation et participation* de la collectivité lors de la réalisation des ouvrages.
- *Formation de responsables* ruraux et mise en place d'un réseau de pièces détachées.

Les différentes étapes de cette action ont été menées avec le concours de "S.O.S Sahel International".

En conclusion, il existe un réseau de maintenance en partie "auto-gérée" par les villageois, mais, parallèlement, la Direction de l'Hydraulique installe dans chaque département des structures décentralisées.

5/ TOGO (M. LE JONCOUR)

Le Ministère des Travaux Publics, Mines, Energie et R.H. a créé en 1980 la *Structure d'Entretien des Pompes* (SEP), rattachée à la Direction de l'Hydraulique et de l'Energie.

Elle a pour attribution de :

- sensibiliser et informer les villageois,
- former des responsables-réparateurs,
- mettre à disposition du personnel qualifié pour les réparations importantes.

Elle dispose pour cela :

- d'un personnel bien formé et efficace,
- d'un matériel bien entretenu (véhicules, outillage,...),
- des moyens financiers nécessaires (Togo : 15 % - FED : 85 %).

De plus, elle a mis en place un réseau de pièces de rechange avec le concours d'une société privée (Société du Golfe de Guinée).

Pour l'avenir, ce système continuera à fonctionner dans la mesure où les villageois prendront en charge progressivement le coût de la maintenance.

\*  
\*  
\*

## II - FORMATION (par J.C. NAPIAS)

La discussion a porté sur la formation des étrangers et l'intégration des Nationaux au sein des équipes du BRGM. La formation professionnelle continue n'a fait l'objet en fin de séance que d'un court débat non préparé.

Un résumé des communications présentées est donnée en annexe 2.

Il apparaît clairement que la formation est la plupart du temps implicite et que les financements ne sont que très rarement prévus, exception faite de la maintenance dont les budgets représentent environ 7 % du coût total des projets.

Tous les participants ont estimé cependant que le rôle des hydrogéologues expatriés était pour une bonne part un *rôle de formateur*. Ils pensent que cette nécessité présente des avantages à moyen terme car la formation est un instrument de promotion excellent, c'est donc un investissement important pour le futur.

Dans la présentation à donner à cette formation, trois points essentiels ont été soulignés :

- la formation se fait en terme de *savoir-faire* par contact "on the job training" ;
- cela demande de la part des agents concernés beaucoup de disponibilité et un *travail supplémentaire*.

La formation s'adresse le plus souvent à des cadres de niveau intermédiaire qui n'ont pas réellement besoin de connaissances théoriques bien que l'obtention de diplômes soit une nécessité pour progresser dans la majorité des administrations.

En conclusion, les participants ont estimé qu'il était nécessaire :

- d'introduire des volets *formation* dès la phase d'évaluation du projet
- de proposer des *variantes chiffrées* aux demandes formulées
- de rechercher des *financements spécifiques* complémentaires.

Une seconde discussion a souligné l'importance de l'intégration des Nationaux dans nos équipes en préconisant de les rechercher dans l'Administration afin qu'ils ne restent pas sans travail en fin de projet et qu'ils facilitent par la suite nos relations avec les décideurs.

Enfin dans le troisième thème abordé, il a été insisté sur la nécessité de la *Formation professionnelle continue* associée à des temps particuliers (en dehors des missions et des congés), mais les participants ont souligné aussi l'importance du passage des agents expatriés au sein de structures métropolitaines.

## A N N E X E 2

### Résumé des communications relatives à la formation

#### 1/ HAUTE VOLTA (B. SOURISSEAU)

L'auteur insiste sur le rôle du personnel voltaïque, dans les équipes BRGM et envisage les différents types de participation (détachement de l'Administration ou recrutement direct).

- Dans le cas d'un *détachement*, on ne peut pas toujours choisir l'agent et la définition claire des conditions d'embauche doit être impérative.
- Dans le cas d'un *recrutement direct*, l'expérience privée intéresse les cadres nationaux (expérience professionnelle, moyens techniques, rémunération, etc...) et le choix est plus facile pour le BRGM.

En conclusion, la première solution est la plus satisfaisante dans la mesure où les qualités socio-professionnelles du cadre détaché répondent aux nécessités du poste, car elle assure une continuité de relation avec les décideurs locaux.

L'auteur fait remarquer que, en Haute Volta, les cadres sont formés dans quatre organismes (dont fait partie l'école du CIEH).

Aucun de ces organismes, cependant, ne forme vraiment à l'hydrogéologie. Il serait donc souhaitable que le BRGM puisse participer à la mise en place d'une telle spécialisation à l'Ecole Inter Etat d'ingénieurs de l'Hydraulique et de l'Equipement rural (EIER).

#### 2/ SENEGAL (R. PANEL)

De 1977 à 1982, le BRGM a détaché en permanence deux ingénieurs auprès du Ministère de l'Hydraulique, dans le but de participer à la création d'un "Service hydrogéologique".

Parallèlement à ces détachements, des coopérants contractuels français, des coopérants internationaux (OMS, PNUD,...) ainsi que des représentants d'autres bureaux d'étude étaient intégrés à ce Ministère.

Les intérêts divergents de ces différentes catégories de personnel rendent parfois très difficile la mission des agents du BRGM.

En conclusion, l'auteur estime que de tels détachements sont importants mais demandent, outre de sérieuses qualités professionnelles, beaucoup de *diplomatie*.

### 3/ TOGO (J.C. NAPIAS)

L'auteur présente un exemple de formation liée à un projet d'Hydraulique villageoise : 4ème FED Togo.

Dans le cadre de ce projet, sur crédits de la ligne budgétaire "formation", le BRGM a formé une équipe complète de Nationaux. Cette équipe a par la suite été mise en situation professionnelle progressive sur le projet "500 forages", réalisé à partir de 1977.

Cet exemple montre que, en fait, la formation tant pratique que technique, n'est possible que si elle est associée à un réel environnement technologique local.

### 4/ PAYS ANGLOPHONES (M. LE NIR)

Dans le cas des pays anglophones où le BRGM ne "travaille" pas, il serait souhaitable de détacher des agents au sein des Ministères afin de les *sensibiliser* et de les *informer* sur nos méthodes de travail et en fin de compte de les faire accepter par nos interlocuteurs.

A terme, l'objectif est de *changer les mentalités* de manière à considérer favorablement nos méthodes de travail.

\* \*

\*

LISTE DES COMMUNICATIONS PRESENTEES  
AU SEMINAIRE



AUTEURS	TITRE	THEME N°
- C. ARMAND	- Préviation du débit des forages peu productifs après développement.	1
- F. BEL	- Historique, bilan et perspectives d'avenir de la foration à l'air dans les régions arides du Maroc.	2
- P. BERARD	- Géomorphologie - Application à la Haute-Volta	2
- H. BONIN	- Les enquêtes préliminaires en Hydraulique Villageoise.	2 3
- G. BRETTE	- Mali : Projet "Eau". Banque mondiale. Recherche de techniques adaptées à l'entretien des pompes manuelles.	4
- J.P. COMTE	- La maintenance au Sénégal : situation actuelle et propositions élaborées au terme de l'étude d'Hydraulique Villageoise "Nord-Sénégal"(1982)	1
- S. COTTEZ	- Utilisation de la méthode électromagnétique(EM 16 R) pour la prospection d'un aquifère suballuvial en Arabie Saoudite (Al Masani Mine).	2
- R. DOMINICI	- Prospection des eaux souterraines en milieu fissuré - Application à la Corse.	2
- D. FOHLEN	- Les fonds arabes.	3
- B. HENOU	- Fonction capacitive en milieu fissuré. Evolution de la réserve en milieu fissuré.	1
- M. LE JONCOUR	- Maintenance au Togo.	4
- R. PANEL	- La programmation en hydraulique rurale : situation actuelle - Propositions. - Détachement d'agents BRGM dans les services nationaux de l'Hydraulique et autres formes de coopération simultanées - Difficultés rencontrées - Expérience au Sénégal.	4
- J. PEIROLO	- Géophysique sur socle granitique : quelques comparaisons de Trainés électriques et V.L.F. en Haute-Volta.	2
- V. PETIT	- Mesures par bilan radiatif.	1
- H. PLOTE	- L'historique des variations des niveaux d'eau souterraine en Afrique : un domaine encore très peu connu. - Photo-interprétation et télédétection. - Recherche d'eau par sondages à l'air en milieu fissuré des régions arides et semi-arides du Maroc.	1 2 2

- X. POUL	- Forage KAI 2 Ter (secteur de Beni Mellal - Maroc)	2
- M. RICOLVI	- Implantation des forages en Hydraulique Villageoise.	2
- J.Y. SCANVIC	- Le traitement de l'image en télédétection.	2
- J.L. SCHNEIDER	- Aitéries en pays tropical humide (Gabon).	2
- B. SOURISSEAU	- Maintenance - Cas de la Haute-Volta - Type de pompes	4
- H. TALBO	- A propos du problème de la ressource en eau en milieu fissuré.	1
- D. THIERY	- Adaptation des modèles hydrologiques aux conditions extrêmes.	1
- J. VALENTIN	- Petite hydraulique appliquée aux pays en voie de développement - Méthodes géophysiques légères - Electro-magnétisme.	

