

**X CONGRESO BOLIVARIANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL,
AIDIS
IX CONGRESO NACIONAL DE LA ASOCIACION ECUATORIANA DE
INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, AEISA
«AMBIENTE Y DESARROLLO, IMPULSADORES DEL PROGRESO»
AGOSTO 11 AL 13 DEL 2003, GUAYAQUIL – ECUADOR**

HYDROGEOLOGIE & FORAGE D'EAU

**Par Pierre ADAM & Patrice BAPTISTE
jemarad@hotmail.com**

L'exposé qui va suivre comprend quatre parties essentielles:

- 1o) le rapport qui existe entre la géologie et les eaux souterraines;

- 2o) la définition du concept d'aquifère;
Présentation de trois (3) coupes techniques de forage
 - Forage ou Puits de l'Avenue N
 - Forages de Duvivier

- 3o) l'importance des études hydrogéologiques avant la réalisation des ouvrages hydrauliques
 - Présentation des modèles de nappes
 - nappe libre
 - nappe captive
 - nappe semi-captive ou à drainance

- 4o) la mise en place des équipements
 - tubes,
 - crépines,
 - gravier additionnel ou massif filtrant

CONTEXTE GENERAL

«L'Eau de boisson saine est le plus beau cadeau que l'être humain peut offrir à son semblable¹». Pour cela, diverses études doivent être faites dans le but de déterminer les comportements des aquifères² pour aboutir à une telle démarche.

L'objectif de ce cours, c'est de porter les étudiants, les techniciens, les ingénieurs et chercheurs confrontés aux problèmes de l'eau à comprendre que «les formations hydrogéologiques perméables constituent les gisements d'eau souterraine ou aquifères dont elles identifient la **configuration** et la structure du réservoir»³. L'hydrogéologie, **science de l'eau souterraine**, a pour finalité la planification de l'exploitation des aquifères ou nappes d'eau souterraine. En

¹ Ecocivisme, Collection Eau douce, Environnement Canada, novembre 1992

² G. Castany, Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Poitiers, Septembre 1985.

³ Maesily G., Simulation en hydrogéologie, In Traité d'information géologique, Masson, Paris, 1975.

effet, «une eau qui est bonne pour une chose ne l'est pas nécessairement pour une autre. L'eau potable peut servir à l'irrigation, mais l'eau d'irrigation ne satisfait pas nécessairement aux normes concernant l'eau potable (Voir analyses physiques du forage de l'Avenue N). Sachez, une fois pour toute que: c'est **la qualité de l'eau qui détermine son utilisation**>>.

Les études hydrogéologiques suivies de prospection géophysiques, des forages d'exploration et d'exploitation ont permis de déterminer les comportements hydrodynamiques⁴ des principaux aquifères d'un pays. La méconnaissance ou l'ignorance des données de base montées à partir de ces études ont conduit à:

- La mauvaise réalisation des captages des émergences dans les calcaires, qui prédominent la formation géologique en Haïti, près de 75%.
- Le mauvais captage des eaux souterraines à partir des forages.

Photo 1.- Equipement d'un forage d'exploration



Source.- **Projet Hai/ 86/003 du PNUD**

Concept d'aquifère

Un aquifère (acque= eau ; fera= je porte) est une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables, par des moyens économiques. C'est un système hydrologique, hydrodynamique. Il est identifié par cinq (5) ensembles:

- i. un réservoir,
- ii. des processus internes ou mécanismes hydrodynamiques, hydrochimiques et hydrogéologiques (Voir note 4).
- iii. une séquence du cycle de l'eau,
- iv. la variabilité dans l'espace de ces caractéristiques (contexte géologique),

⁴ Impulsion, transfert et réponse constituent les comportements hydrodynamiques de l'aquifère.

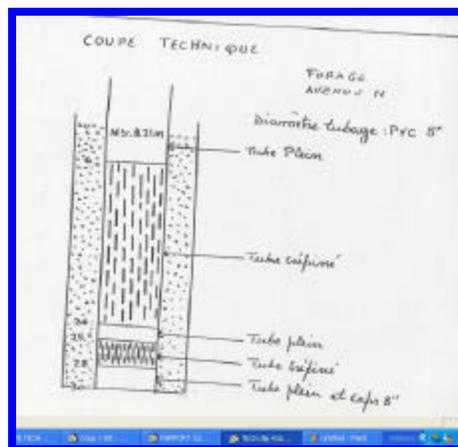
- v. des conditions de temps (L'aquifère est comparable à un gisement minier, dont le minerai **l'eau** est plus ou moins renouvelable).

Nous ne maîtrisons pas toutes les techniques permettant de confirmer que tel ouvrage hydraulique, réalisé suivant les caractéristiques hydrogéologiques va être positif ou pas. Cependant, en fonction de certains critères connus dès le départ, nous devons savoir à quelle profondeur donnée, dans une formation géologique donnée et, suivant la géomorphologie, nous devons réaliser un **forage** devant servir à alimenter en eau potable une population donnée. L'illustration de 4 plans de tubage de forage, va nous aider à mieux nous faire comprendre.

I.- Le forage de Avenue N

Ce forage réalisé dans la zone de l'**Avenue N**, à la profondeur de 30 mètres, dans une formation fissurée ou dépressionnaire, avec l'insalubrité de l'environnement, pose un problème en ce qui concerne la **qualité de l'eau**. Dans le cas où les pertes de circulation empêcheraient l'avancement de l'outil, et que ce point d'eau serait la seule solution pour alimenter la population de la zone, des mesures appropriées devraient être prises pour éviter la contamination de la nappe par les eaux superficielles.

Figure 1.- Plan de tubage du forage de l'Avenue N



Source.- - CAMEP

L'hydrogéologue avisé doit se poser les questions suivantes :

1. Pourquoi a-t-on réalisé ce forage à cette profondeur ?
2. Y aurait-il des pertes de boue importantes (quelques mètres cubes /heure) ou des pertes totales (vastes cavernes telles: zone corps du

pompier, pompe 28 aux Gonaïves) qui sont dangereuses pour le train de tige ou pour l'ouvrage tout entier?

3. Vu la prolifération des maisons dans le Bassin hydrographique du morne de l'Hôpital, a-t-on pensé à isoler les 10 premiers mètres de l'ouvrage pour empêcher la contamination de la nappe par les eaux superficielles et les polluants persistants⁵?

Les analyses physico-chimiques montrent que les valeurs trouvées dépassent les normes. La conductivité est de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$; alors que pour une eau devant servir à l'alimentation, elle doit être comprise entre 400 et 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Quant aux analyses bactériologiques, les coliformes fécaux sont inférieurs à 1 pour un échantillon de 100 ml d'eau; cependant la présence d'amas d'autres bactéries a été identifiée. **On n'aurait pas dû, en aucun cas, capter la nappe libre, à partir d'une crépine située à 9 mètres pour exploiter cet aquifère**

II.- Le forage de Puits Blain

Ce forage même foré à 60 mètres de profondeur, dans la nappe semi-captive, ne peut pas fournir un débit satisfaisant pour desservir la population. Pourquoi?

- 1) Parce que l'inventaire de tous les points d'eau existants, montre que dans une telle formation géologique, le débit est quasi nul.
- 2) La collecte des échantillons (Voir photo 1) pour chaque mètre foré devrait montrer clairement que dans cette formation géologique, il n'existe pas d'aquifère vraiment positif.

Photo 1.- Un modèle de collecte d'échantillons pour la fabrication des crépines

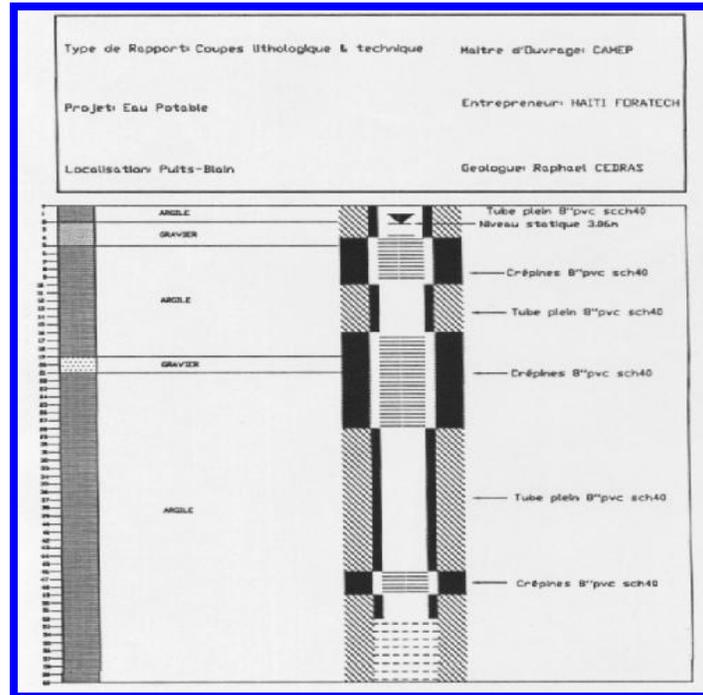
⁵ Les composants lixiviés des décharges par les ordures ménagères et les déchets industriels. Certains de ces contaminants se dégradent très lentement ou ne peuvent pas être décomposés : ils demeurent dans le milieu aquatique pendant des années ou plus longtemps encore.



Source :Projet HAI/86/003 du PNUD

3.- Les émergences de Puits Blain, en particulier "Source Puits Blain" ne devraient pas constituer un indicateur-clé pour réaliser un tel forage; car en faisant le «développement à l'air lift», le puits témoin, qui est à quelques mètres du forage et qui joue le rôle de piézomètre, était asséché.

Figure 2.- Coupe technique du forage de Puits Blain



Source.- CAMEP

4) Les analyses physico-chimiques et bactériologiques ont montré une forte salinité⁶ et des Amas d'autres Bactéries (AB) pour le puits et les émergences. **On n'aurait pas dû, en aucun cas, capter la nappe libre, à partir d'une crépine située à 4 mètres pour exploiter cet aquifère.**

5) Du point de vue géomorphologique, on pourrait croire à l'existence d'une nappe. Cependant la formation marno-calcaire indique que même s'il existait un "aquifère perché" dans la zone, sa gestion devrait être très efficace et ne pourrait pas servir à alimenter plus de 1000 personnes; car la réalimentation naturelle de la nappe peut ne pas être continue.

⁶ Salinité de l'eau ou minéralisation totale est la somme des ions dissous dans l'eau. Il existe un rapport direct entre la salinité totale et la conductivité de l'eau.

Pourquoi des études hydrogéologiques avant la construction des ouvrages hydrauliques?.

Elles permettent de présenter la cartographie de la surface piézométrique de la nappe, de déterminer les caractéristiques physico-chimiques de cette dernière dans le but d'identifier le contexte géologique dans lequel l'ouvrage sera réalisé et, enfin d'observer l'évolution des cations et des anions dans le temps et dans l'espace. C'est grâce à elles qu'on arrive à

- 1- connaître l'épaisseur des formations géologiques (dépôts sédimentaires, grès fissurés, alluvions, sable, gravier, galets, basalte fissuré) ainsi que leur degré de perméabilité, de porosité, de transmissivité,...etc.
- 2- déterminer la bathymétrie, c'est à dire la profondeur des forages; car il est essentiel de connaître de façon claire et précise: le niveau piézométrique (water table) du forage, son niveau dynamique et surtout sa profondeur totale.
- 3- tracer les cartes altimétriques pour déterminer les altitudes des ouvrages qui vont servir à déterminer la Hauteur Manométrique Totale (Net Positive Section Head) pour l'efficacité de la pompe qui sera installée sur le forage.
- 4- Faire le bilan hydrique des **Ressources en Eau Totalement Disponibles (R.E.T.D)** dans un pays, dans le but de planifier leur gestion et de prévenir sur les dangers encourus, suite à une surexploitation ou une exploitation anarchique par divers intervenants.
- 5- faire le contrôle régulier de la conductivité et la salinité⁷ de l'eau des forages. Ils sont deux (2) paramètres importants dans le choix à faire pour l'utilisation de l'eau. Les salinités résultent des conductivités. Elles sont exprimées en parties par millions ou ppm, mesurées in situ, avec des conductivimètres portables sur des ouvrages d'eau (piézomètres et forages d'exploitation). Dans le cas de la Plaine du Cul de Sac, il existe deux secteurs d'eau en fonction du contexte géologique:

- A) Secteur à eau douce < 1000 ppm (parts per million)
- B) Secteur à eau salée > 1000 ppm.

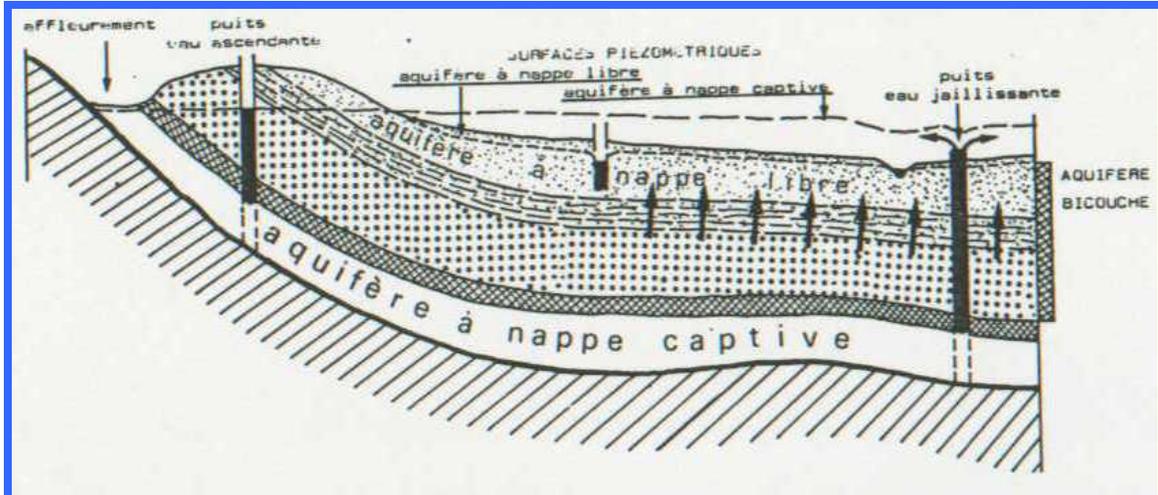
La valeur de 1000 ppm est considérée comme la limite entre l'eau douce et l'eau salée. Du point de vue chimique, une eau d'irrigation peut être utilisable avec une salinité plus élevée.

- 6- identifier les modèles de nappe dans un réseau hydrographique à l'aide des piézomètres à partir des données très précises et cohérentes. C'est ainsi qu'on parle de:

⁷ Evolution piézométrique et physico-chimique de la nappes du Cul de Sac, Rapport HAI – 79-001 No 78, PNUD, Haïti, 1983-1985.

a) **nappe libre** ou nappe superficielle identifiée par des puits et sondages du premier aquifère. Elle se situe sous la surface du sol. Elle est considérée comme le niveau piézométrique. Les profondeurs sont le plus souvent inférieures à 30 mètres. Cette surface peut s'élever ou s'abaisser librement dans la formation hydrogéologique perméable, d'où la dénomination d'aquifère à nappe libre.

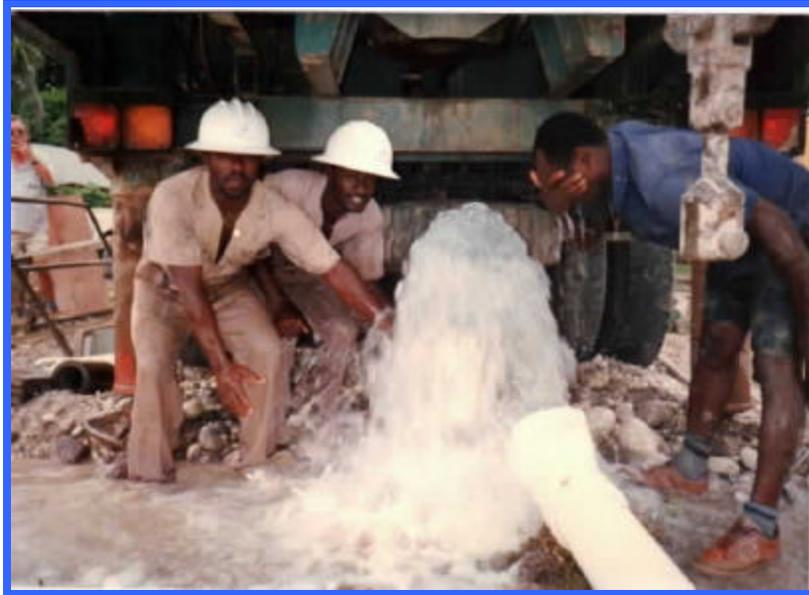
Figure 3.- Configuration des aquifères: nappe libre, nappe captive



Source.- G. Castany (Voir note 2)

b) **nappe captive** qui se situe entre la surface piézométrique et le substratum (base de l'aquifère). Les eaux souterraines sont emprisonnées dans la formation hydrogéologique perméable entre deux formations imperméables fixes: le substratum à la base et le toit au sommet. La profondeur est supérieure à 30 mètres. Les eaux souterraines sont dites ascendantes. Le forage peut être artésianisme jaillissant ou non (Voir photo 2).

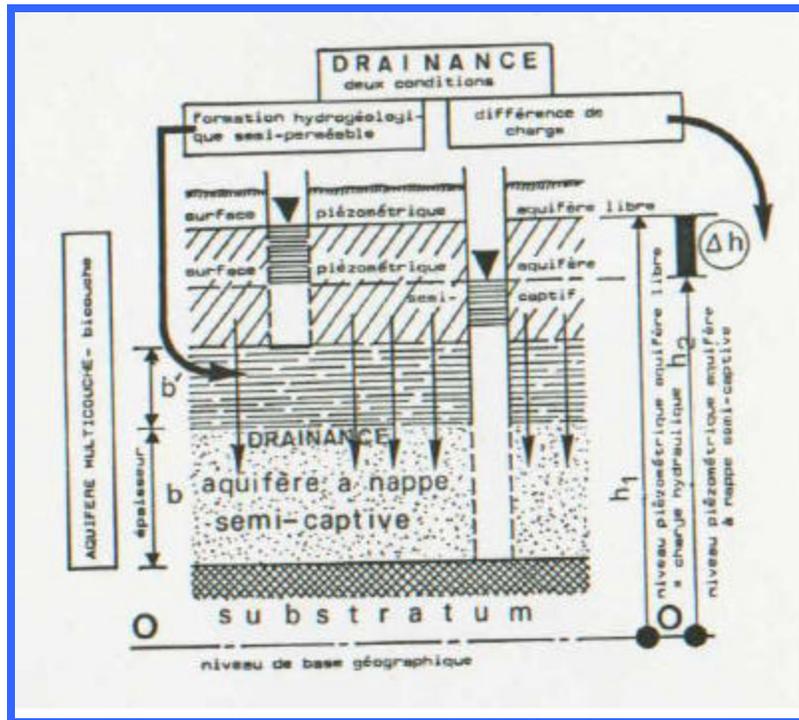
Photo 2.- Un forage artésianisme jaillissant, réalisé à Formon, dans le Sud d’Haïti



Source :Water resources, UNDTD, in 1990's

c) nappe semi-captive ou à drainance où le toit ou le substratum (ou les deux) de l'aquifère sont souvent constitués par une formation hydrogéologique semi-perméable. Dans certaines conditions hydrodynamiques favorables, il y a des différences de charge qui favorisent des échanges d'eau (ou de pression) avec l'aquifère superposé ou sous-jacent, appelé **drainance**. La formation est alors incorporée à un aquifère multicouche.

Figure 4.- Configuration d'un aquifère à nappe semi-captive ou à drainance



Source : G. Castany (Voir note 2)

III.- Les forages de Duvivier

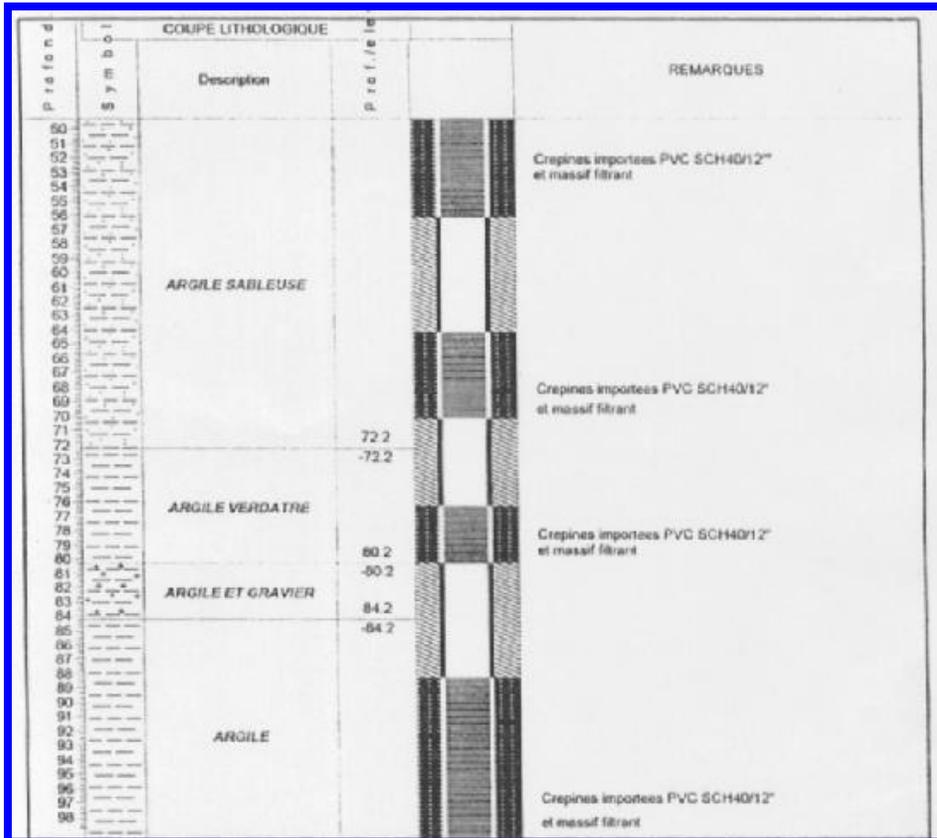
Dans des formations homogènes, pour l'équipement de la zone de captage, il faut bien connaître l'épaisseur de l'aquifère. Ainsi la collecte des carottes ou cuttings doit être faite avec grande précaution (Voir photo 1) par un technicien hydrogéologue qui fournit au foreur, les données essentielles sur la nature, la position, l'épaisseur et l'étendue des couches qu'on désire exploiter.

En plus du carottage mécanique, il y a aussi le carottage électrique ou log électrique qui, dans le cadre de forage de reconnaissance, permet en mesurant le potentiel et la résistivité électriques des terrains, d'ausculter un forage, non encore tubé, sur toute sa hauteur.

Le forage D₁

Ce forage que nous présentons ici, a été réalisé à une profondeur de 100 mètres (328 pieds). Il a été capté sur toute sa longueur par une alternance de tubes pleins et crépinés.

Figure 5.- Plan de tubage du forage D₁

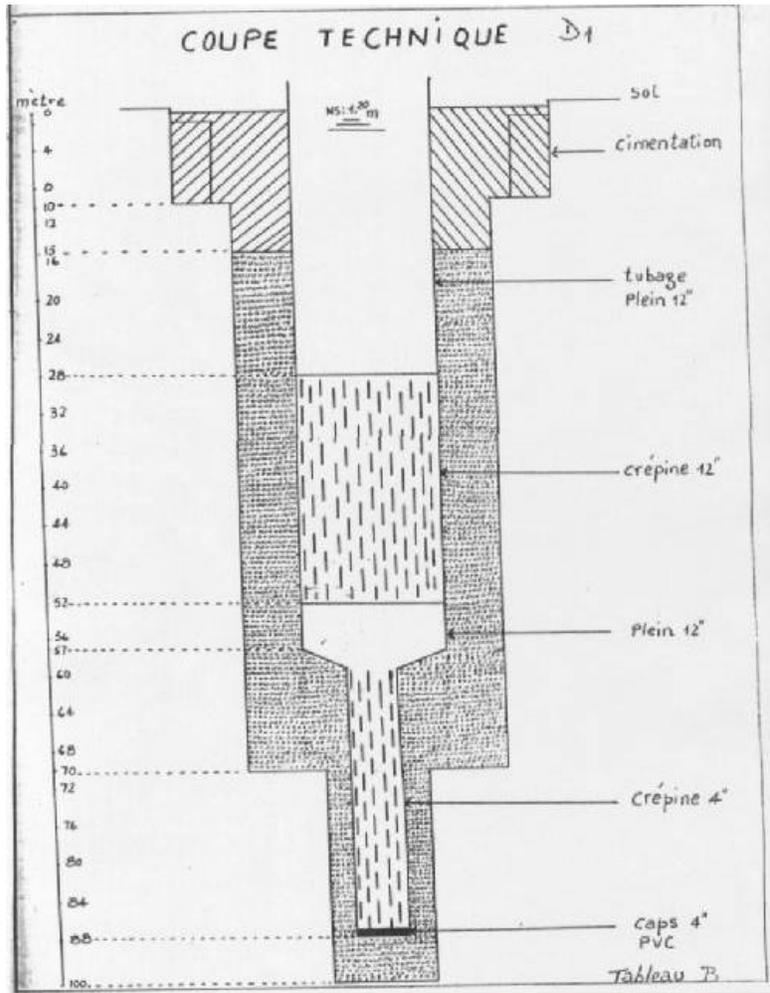


Source CAMEP

Le forage D₃

Le forage D₃ que nous vous présentons également a été réalisé à une profondeur de 100 mètres (328 pieds) et la nappe a été captée de 28 à 54 mètres.

Figure 6.- Plan de tubage du forage D₃



Source CAMEP

Les essais de pompage réalisés sur les deux (2) forages donnent $170\text{m}^3/\text{h}$ pour D₃ et $180\text{m}^3/\text{h}$ pour D₁. Comment expliquer que les ouvrages réalisés à la même profondeur, jusqu'au mur de la couche aquifère, ont des débits différents?

La réponse est simple : la mise en place de l'équipement:

- tubes
- crépines
- gravier

Le carottage mécanique ou le log électrique une fois terminé, le plan de tubage doit être étudié pour un meilleur choix de l'équipement tubulaire

a) les tubes

Les tubes doivent être positionnés en fonction de l'épaisseur de l'aquifère qui peut être bicouche ou multicouche. Dans le cas des forages de Duvivier, pour **D₁**, un plan de tubage en sandwich (alternance de tubes pleins et crépinés) a été appliqué; tandis que pour **D₃**, toute l'épaisseur de l'aquifère a été captée.

b) La crépine

La crépine, c'est l'élément principal de l'équipement d'un forage d'eau. C'est une pièce de précision qui doit être construite après l'établissement de la courbe granulométrique. Dans le cas des deux forages de Duvivier, ni la vitesse de l'eau, ni la granulométrie n'ont pas été prises en compte. La différence des débits montre que même si à une certaine profondeur, les terrains sont homogènes, il existe un aquifère bien spécifique à capter.

c) Le gravier additionnel⁸

Les caractéristiques du gravier additionnel doivent être bien définies pour la détermination de l'ouverture de la crépine. L'épaisseur doit être régulière sur toute la hauteur du massif qui doit être placée de telle manière que son niveau supérieur soit nettement au-dessus du toit de la plus haute couche de l'aquifère. Une sonde à gravier permettra de mesurer la hauteur dans l'espace annulaire.

Il est souvent recommandé d'utiliser du gravier siliceux à grains roulés. Il doit être soigneusement criblé et lavé. Il joue un rôle de stabilisateur de formation. En terme de prévention, il est toujours bon d'installer un **trou filtrant** de 3/4 à 2 pouces dans l'espace annulaire ou le trou du forage pour ajouter le massif dans le cas où l'ouvrage ferait l'objet des éboulements ou la colonne de captage serait déformée (Cas typiques: forages de Duvivier, forages de Bon repos en Haïti).

Ainsi quand les éléments suscités ne sont pas pris en considération, la durée de vie de l'ouvrage est limitée et seul un Ingénieur hydrogéologue sera capable d'apporter les remèdes essentiels au dépérissement des forages d'eau.

Des études approfondies sur les forages d'exploitation réalisés à travers le monde et, en particulier, en Haïti par le PNUD dans le cadre du Projet « Gestion et développement des eaux souterraines » doivent dès aujourd'hui, vous guider sur les méthodes à adopter pour la réalisation des ouvrages hydrauliques (forage, captage, impluvium, lac collinaire) dans le but de gérer non seulement de façon efficace les ressources en eau; mais aussi de conserver la qualité de **l'eau**, considérée comme le « **fluide vital de l'environnement** ».

⁸ Le forage d'eau, guide pratique, Albert MABILLOT, Saint-Etienne, France, 1980.

BIBLIOGRAPHIE

HAÏTI- ECONET, La gestion de l'environnement en Haïti, Henri Deschamps, Port-au-Prince, Haïti, 1998 ;

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM (UNDP), Sustained human development and agriculture, UNDP, New-York, 1994;

ADAM, Pierre, Evaluation des projets en Eau et Assainissement dans les Plaines alluviales d'Haïti, Unicef, Port-au-Prince, Haïti, 1992;

ANTONUS, Pascale, Etude Hydrogéologique de la Savane Désolée, PNUD / MARNDR, Port-au-Prince, Haïti, 1990;

RADSTAKE, Frank, Prospection géophysique de la Savane Désolée et de la Vallée de la Rivière des Bayonnais, Port-au-Prince, Haïti, 1990 ;

CYR, Marcel, Ecologie principes de base, Editions du Renouveau Pédagogique Inc., Ottawa, Canada, 1983 ;

PNUD / FAO, Enquêtes sur les terres et les eaux dans la Plaine des Gonaïves et le Département du Nord-Ouest, Papport final Volume II, Pédologie, Haïti-Rome, 1969 ;

PNUD / FAO, Enquêtes sur les terres et les eaux dans la Plaine des Gonaïves et le Département du Nord-Ouest, Papport final Volume IV, Génie Rural, Haïti-Rome, 1969.