

**CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES ET
HYDROCHIMIQUES DES AQUIFERES EXPLOITES DANS LA ZONE
DU GORGOL - GUIDIMAKHA**

Deuxième partie : CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES ET HYDROCHIMIQUES DES AQUIFERES EXPLOITES DANS LA ZONE DU GORGOL – GUIDIMAKHA

1. HYDROGEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

Dans la zone d'étude, la structure géologique permet de distinguer deux types d'aquifères : les aquifères dits continus du bassin sédimentaire côtier et les aquifères discontinus du socle (Fig. 14). La contrainte des facteurs climatiques (vent et températures élevées) contribue à une alimentation extrêmement limitée des aquifères. L'essentiel des eaux souterraines en Mauritanie sont des eaux dites « fossiles », qui se sont infiltrées durant les phases humides du Quaternaire récent (Inchirien, et surtout Tchadien et Nouakchottien) (Carité, 1991).

1.1. Les aquifères dits continus ou généralisés

La région se présente comme un vaste ensemble volcano-sédimentaire issu de la combinaison de phénomènes de volcanisme, de tectonique et de métamorphisme entrecoupés de phases de sédimentation. Si la structure géologique est complexe, on peut toutefois distinguer trois grands ensembles hydrogéologiques : les formations superficielles récentes constituées par les massifs dunaires et alluvions du fleuve Sénégal et de ses affluents, le socle des Mauritanides et les formations sédimentaires gréseuses. Ces ensembles hydrogéologiques renferment quatre aquifères potentiels produisant des débits plus importants et des eaux de bonne qualité (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

1.1.1. Les nappes alluviales

Les nappes alluviales, localisées à proximité du fleuve ou des oueds et marigots, exploitent les ressources superficielles (BURGEAP, 2006 ; Hydro conseil et Coopération française, 2005).

Les alluvions, dont l'épaisseur est en moyenne de 15 m sur les bordures et de 35 m dans la vallée, sont de nature argileuse à sablo - argileuse au sommet, sablo - argileuse à sableuse à la base. Elles constituent un réservoir aquifère important et étendu qui repose, de l'est vers l'ouest, sur le socle cristallin, les formations de l'Eocène et par endroits sur le Maastrichtien, puis sur celles du Continental Terminal.

Ces formations peuvent être très perméables, avec (perméabilité de l'ordre de $1.10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$). Dans la partie aval du cours d'eau les caractéristiques hydrodynamiques des alluvions sont médiocres (BURGEAP, 2006). Dans le Guidimakha les alluvions sont très sableuses dans le cours supérieur des oueds issus des massifs granitiques ou gréseux. Par contre dans les cours inférieurs à faible pente, notamment ceux des grands oueds (Niorde, Garfa) les alluvions, très argileuses, sont pratiquement stériles. La nappe des alluvions est alternativement alimentée et drainée par le fleuve, selon son niveau, le fleuve alimentant la nappe alluviale en hautes eaux. La réalimentation pourrait être restreinte à une zone d'une dizaine de kilomètres de large au delà de laquelle l'influence du fleuve ne se ferait plus sentir. Elle semble décroître de l'amont vers l'aval. En étiage le niveau du fleuve est généralement inférieur à celui de la nappe des alluvions en basses eaux : la nappe est alors drainée par le fleuve, et il arrive que localement elle soit « perchée » par rapport à lui (BURGEAP, 2006).

En raison du colmatage du lit du cours d'eau et de la nature plutôt argileuse des alluvions, la réalimentation de la nappe alluviale paraît donc surtout due pour une large part à l'infiltration sur de vastes surfaces inondées lors des crues, plutôt qu'à la propagation, à partir du fleuve, d'une onde de crue dans l'aquifère (BURGEAP, 2006).

Ce type d'aquifère, exploité le plus souvent par des ouvrages traditionnels (puisards et puits traditionnels), revêt une importance capitale pour l'alimentation en eau de la population du Guidimakha. Son épaisseur est très faible : de quelques décimètre à quelques mètres selon les lieux. L'approfondissement progressif des ouvrages suit l'avancement de la saison sèche. Faute de soulèvement, la profondeur est limitée dans ces zones, d'où les faibles débits observés ($0,1$ à $1 \text{ m}^3.\text{jour}^{-1}$). De plus, les niveaux d'eau subissent une baisse saisonnière plus ou moins importante selon l'exploitation de la nappe. La quasi-totalité des ouvrages tarit au cours de la saison sèche. Les nappes alluviales peuvent également être exploitées par des puits modernes. Lorsque ces derniers captent toute l'épaisseur des alluvions, ils donnent des débits appréciables (de 1 à $5 \text{ m}^3.\text{jour}^{-1}$) (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

La qualité de l'eau de la nappe est douce excepté dans la partie aval du cours où elle devient salée en raison de la remontée de la mer dans le fleuve. Ce front salé pouvait autrefois atteindre en étiage Podor à 400 km à l'intérieur des terres en amont de l'embouchure. Ce phénomène n'existe plus depuis la construction du barrage anti sel de Diama, qui maintient désormais le niveau du fleuve entre les cotes $+1,5$ et $+1,75 \text{ NGM}$ au lieu de la cote -1 NGM auparavant. Avec la mise en service de ce barrage on a observé en 1987, dans la partie avale,

une remontée du niveau de la nappe. Des remontées du niveau de la nappe sont également observées lors des lâchers à partir du barrage de Manantali (BURGEAP, 2006).

1.1.2. La nappe de recouvrement sableux (ou des formations dunaires)

La nappe de recouvrement sableux exploite les eaux emmagasinées dans les sables situés en bordure de la chaîne de l'Assaba. Son alimentation s'effectue à partir de l'infiltration des eaux de pluies. Elle présente des débits importants ainsi que d'excellentes caractéristiques chimiques dans les zones où l'épaisseur des sables est importante (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

Les sables dunaires se caractérisent par leur forte perméabilité : l'eau s'y infiltre facilement. L'épaisseur de ces couches géologiques peut atteindre une vingtaine de mètres (EL Aweinal). Le potentiel de la nappe contenue dans ces sables varie en fonction de leur épaisseur et de la pluviosité de l'hivernage précédent. Elle est exploitée par des puits traditionnels ainsi que par quelques puits modernes qui peuvent capter toute l'épaisseur de la couche sableuse. Les puits traditionnels ont une profondeur variant de 5 à 30 m, et présentent de faibles débits : de 1 à 8 m³ h⁻¹ suivant l'épaisseur de la nappe (le puits pastoral de EL Aweinatt fournit un débit supérieur à 10 m³ h⁻¹ à une profondeur de 30 m) (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

La piézométrie approximative de la nappe des sables de l'Aouker a été difficilement tracée à partir des relevés des puits effectués par Barreto en 1961, avec les cotes de référence des niveaux. Dans cette zone accessible qu'à chameau, les cotes de la nappe sont calculées en priorité à partir des cotes du sol et des courbes de niveau indiquées sur les cartes topographiques au 1/200 000 et à partir des altitudes barométriques du sol indiquées par Barreto (BURGEAP, 2006).

Dans sa partie occidentale la nappe présente un axe de drainage marqué entre les cotes 180 et 120 NGM, au niveau de la vallée du Taskass, qui correspond à une gouttière tectonique entre Assaba et R'Kiz. De part et d'autre de cet axe la nappe s'écoule vers l'est depuis la falaise du Tagant et vers le sud et le sud-ouest depuis Timoujaj (BURGEAP, 2006).

Dans sa partie centrale il semble que la nappe présente un dôme piézométrique à la cote 180 NGM : s'il était confirmé, ce dôme serait la preuve manifeste de l'alimentation « directe » des nappes de dunes dans des secteurs arrosés annuellement entre 100 et 200 mm de pluie seulement (BURGEAP, 2006).

Dans la partie orientale la piézométrie de la nappe est moins précise en raison du nombre réduit de points d'eau sauf dans le secteur de Outfen. Au sud-ouest elle semble se raccorder à la nappe des pélites du Hodh aux environs de la cote 160 NGM dans la région de Moulguen, Mahbou, Bou Tezar. La perméabilité des sables de l'Aouker, dépourvus d'argile, paraît être bonne et elle pourrait être de l'ordre de 10^{-4} m.s^{-1} (BURGEAP, 2006).

L'eau de la nappe des sables de l'Aouker du Hodh est peu minéralisée, excepté sur quelques rares puits, à l'ouest : Hassi N'Barek (RS 5,5 g.l^{-1}), Reddane (RS 3,5 g.l^{-1}), à l'est : Arengues Gebilé (RS 2 à 4 g.l^{-1}) (BURGEAP, 2006).

1.1.3. La nappe des formations gréseuses

La nappe des formations gréseuses occupe la partie orientale du Guidimakha. Elle capte les eaux souterraines emmagasinées dans les formations gréseuses situées dans les zones de forte fracturation ou de porosité importante. Cette nappe offre des débits moyens et son exploitation nécessite souvent des études géophysiques préalables (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

Les formations gréseuses qu'elles soient compactes ou détritiques, constituent souvent un ensemble imperméable. Toutefois, l'existence d'un réseau de fissures et de failles très régulier leur confère une « perméabilité de fracture ». Ces formations jouent aussi un rôle de drain qui alimente la nappe des massifs dunaires (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

Les débits obtenus par les forages sont faibles (de 0,5 à 5 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$). Un débit d'exploitation supérieur ou égale à 5 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ ne peut être obtenu que sur une fracture majeure. Les niveaux statiques varient dans une large mesure (de 4 à 25 m). Ils atteignent exceptionnellement 30 m. Lorsqu'ils sont réalisés au niveau d'un réseau de fissures ou d'un point d'alimentation, les puits captant la nappe peuvent fournir des débits appréciables (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

Dans toute la partie orientale de la Wilaya, qui correspond à la série de Kiffa, le taux d'échec des forages est élevé (63%). Cela s'explique par le fait que cette formation est constituée de roches (pélites, grès) imperméable et que les failles y sont peu nombreuses. En revanche, la série gréseuse de Sélibaby, qui est fortement plissée et métamorphisée, présente un taux d'échec moins élevé (37%). Cette série représente une bande peu épaisse passant à l'est des communes de Bouaze et Dafart et se prolongeant jusqu'à Khabour et Gouraye (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

Généralement les eaux de la nappe sont bicarbonatées et chargées en sels minéraux, avec une conductivité moyenne de $960 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Toutefois, cette minéralisation varie très largement, il existe des eaux très faiblement minéralisées (dont la conductivité électrique est inférieure à $300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et des eaux très fortement chargées (ayant une conductivité électrique supérieure à $1500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). L'ensemble des ouvrages des communes de El Aweinatt, Lahraj et Soufi fournit des eaux peu salées. A Sélibaby et Tektaké, seuls trois ouvrages sur les 45 recensés ont une eau salée. En revanche, pour les autres communes, sur 177 ouvrages, 35 (soit 20%) ont une eau fortement salée (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

1.2. Les aquifères discontinus

La nappe du socle occupe l'espace central du Guidimakha. L'eau se situe essentiellement dans la fracture. Seule les ouvrages réalisés dans des zones de forte fracturation, dans lesquelles l'épaisseur de l'altération est importante, sont productifs. Contrairement au cas des aquifères sédimentaires, le choix de l'emplacement des ouvrages est soumis dans les zones de socles à des critères purement locaux. Il doit être fondé sur le repérage des fractures à partir d'une photographie aérienne, précisée le cas échéant par prospection électrique locale (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

Le potentiel hydraulique de ces aquifères dit discontinu, est fonction de l'intensité et de la taille des fractures ainsi que de leur réalimentation. Cette dernière dépend de l'épaisseur de la couche d'altération qui par sa forte capacité d'absorption, assure l'alimentation des fractures de la roche mère sous-jacente. Cependant dans la région du Guidimakha, la couche d'altération est peu épaisse (6,4 m en moyenne) et généralement sèche, ce qui explique le taux élevé des forages négatifs (51 %). Seuls les aquifères fournissant un débit instantané de l'ordre du $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ sont exploités par des forages. Cependant, ils peuvent aussi être exploités par des puits, lorsque ces derniers sont implantés sur des fractures ou mieux à l'intersection des fractures, captant ainsi la zone altérée et assurant des débits constants et élevés pouvant excéder les $10 \text{ m}^3\cdot\text{jour}^{-1}$ (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

D'une manière générale, les aquifères du socle possèdent des eaux très chargées et donc salées. Leur conductivité moyenne s'établit à près de $1350 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, avec des pics pouvant dépasser $3000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Dans les communes de Ajar et Wampou, il n'existe que quatre ouvrages ayant une eau salée alors que, dans les communes de Arr, Bouanz, Darfort, Hassi

Cheggar et Woulouboni, environ 30 % des ouvrages (44) sont dans ce cas (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

Si les ressources des alluvions et des massifs dunaires sont plus facilement accessibles et jouent un rôle capital dans l'alimentation des aquifères discontinus, elles n'en demeurent pas moins très limitées, si bien que les ouvrages qui exploitent ces nappes présentent des débits faibles (de l'ordre de $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$). L'essentiel des ressources en eau exploité dans le Guidimakha provient des aquifères discontinus du socle et des formations gréseuses. Ces dernières sont constituées de roches imperméables et peu fracturées alors que les formations valcano-sédimentaires du socle sont fortement fracturées mais présentent une faible épaisseur d'altération (Hydro conseil et Coopération française, 2005).

De nombreux forages ont été réalisés dans cette zone dans le cadre de plusieurs programmes d'hydraulique villageoise et pastorale. Plus de 760 forages sont recensés dans la base SIPPE dans les wilayas de cette zone des Mauritanides (Assaba, Gorgol, Brakna et Guidimakha) malheureusement, la coupe géologique n'est pas connue, pour près de la moitié des forages (BURGEAP, 2006).

Pour ceux dont la coupe est connue, le réservoir aquifère est constitué de schistes, de micaschistes et de quartzites et de granites. Ces formations ne se révèlent aquifères que si elles sont fissurées, les roches saines étant imperméables. L'implantation des points d'eau se fait évidemment sur linéaments détectés sur photographies aériennes, avec une prospection géophysique indispensable lorsque l'on recherche des débits importants (BURGEAP, 2006).

Les taux de succès des forages sur la base de la nature des aquifères sont les suivants : 34% dans les schistes, les micaschistes et les quartzites, il est plus élevé et est égal à 62%, dans les granites du Guidimakha (BURGEAP, 2006).

La profondeur moyenne des forages positifs est de 54 m dans les schistes, micaschistes et quartzites et de 63 m dans les granites du Guidimakha (BURGEAP, 2006).

Le débit instantané moyen (respectivement $2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) est pratiquement identique dans les schistes, micaschistes et quartzites, et dans les granites. Le débit instantané maximum est égal à $8,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Il s'agit de forages d'hydraulique villageoise et pastorale pour lesquels le débit recherché doit permettre l'installation d'une pompe manuelle. Une autre analyse, à partir de l'implantation des forages sur la carte géologique au 1/500 000 donne les pourcentages de succès suivants (BURGEAP, 2006) :

43% pour les groupes à dominante schistes et micaschistes (El Ghabra, El Mseigguem, El Fadra, El Harach, Gadel et Gueneiba) et schistes rencontrés dans le cortège du Guidimakha : (nombre de forages 555 dont presque la moitié sans indication géologique).

56% pour le groupe de Djonaba avec pélites, schistes, micaschistes, tillite et grès : (nombre de forages 152 dont plus du tiers sans données géologiques),

52% pour le cortège du Guidimakha et groupe de Djonaba avec granites et granodiorites : (nombre de forages 56, dont plus de la moitié sans indication géologique).

L'eau de la nappe est généralement douce avec une salinité inférieure à 1 g.l^{-1} , excepté dans le Brakna où quelques forages ont rencontré de l'eau saumâtre et salée avec des résidus secs de 3 à 8 g.l^{-1} (BURGEAP, 2006).

2. ESSAIS DE POMPAGE

2.1. Reconstitution des formations géologiques traversées par les forages

Les caractéristiques des forages testés au cours de la campagne des essais de pompage sont données par les figures (15 et 16).

Le forage d'Agoynit est situé sur la bordure d'un oued qui se déverse dans l'oued Garfa. Les formations géologiques en présence sont constituées par des gabbros, tonalites et granodiorites de l'arc de la chaîne des Mauritanides.

Le forage de Tachott est situé sur la bordure d'une branche de l'oued Niorda. Les formations géologiques en présence sont constituées par des gabbros, tonalites et granodiorites de l'Arc des Mauritanides.

Le forage d'AJAR Soninkés est situé sur le bord d'un oued qui se déverse dans l'important oued Garfa. Les formations géologiques en présence sont constituées par des schistes et phyllithes élitiques de l'arc de la chaîne des Mauritanides.

Le forage de Diowol est situé sur la bordure du fleuve Sénégal. Les formations géologiques en présence sont constituées par des alluvions du fleuve qui reposent sur les grès de l'Eocène du bassin sédimentaire du sud-ouest mauritanien.

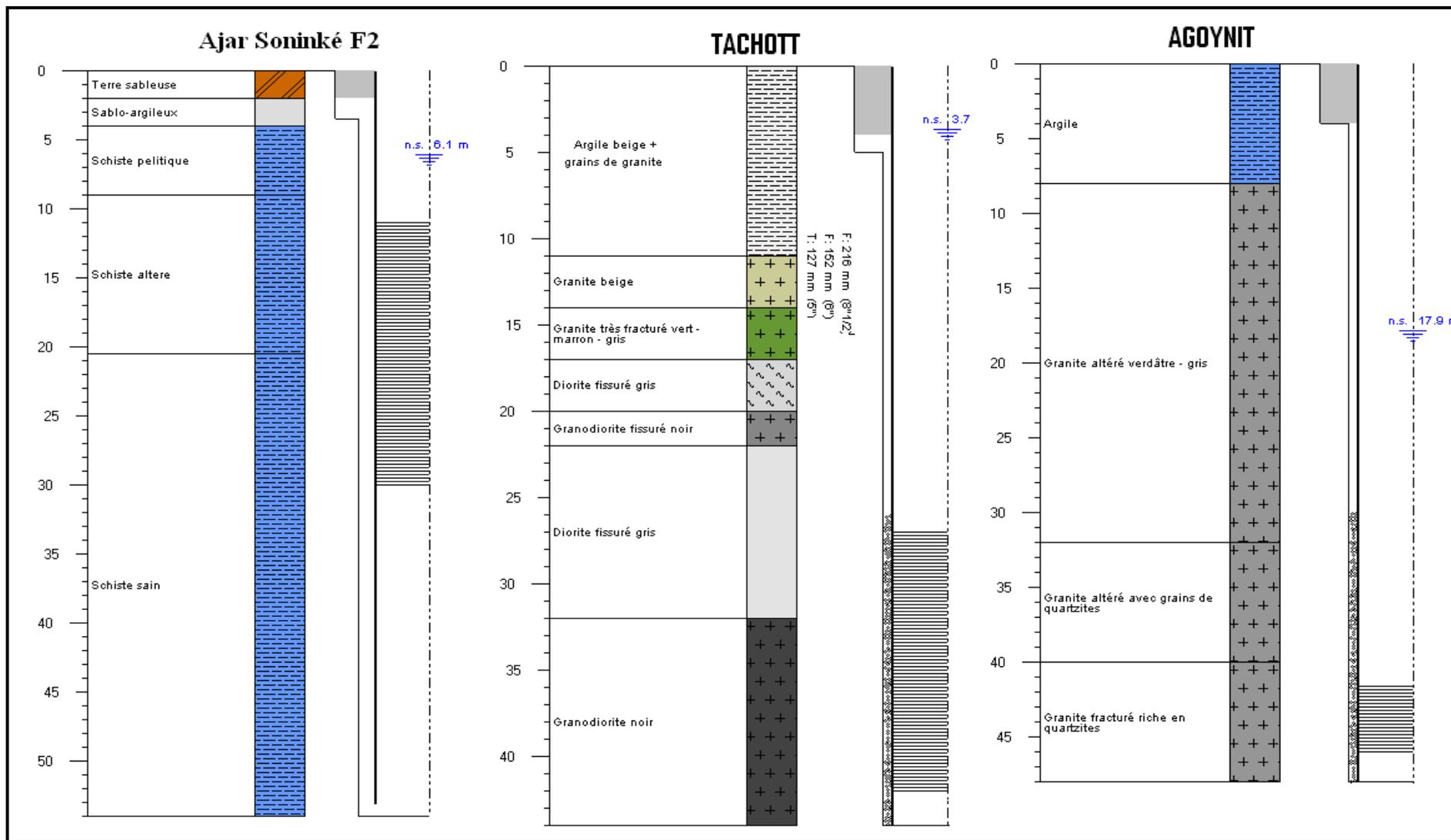


Figure 15 : Coupes lithologiques des forages d'Ajar Soninké F2, de Tachott et d'Agoynit

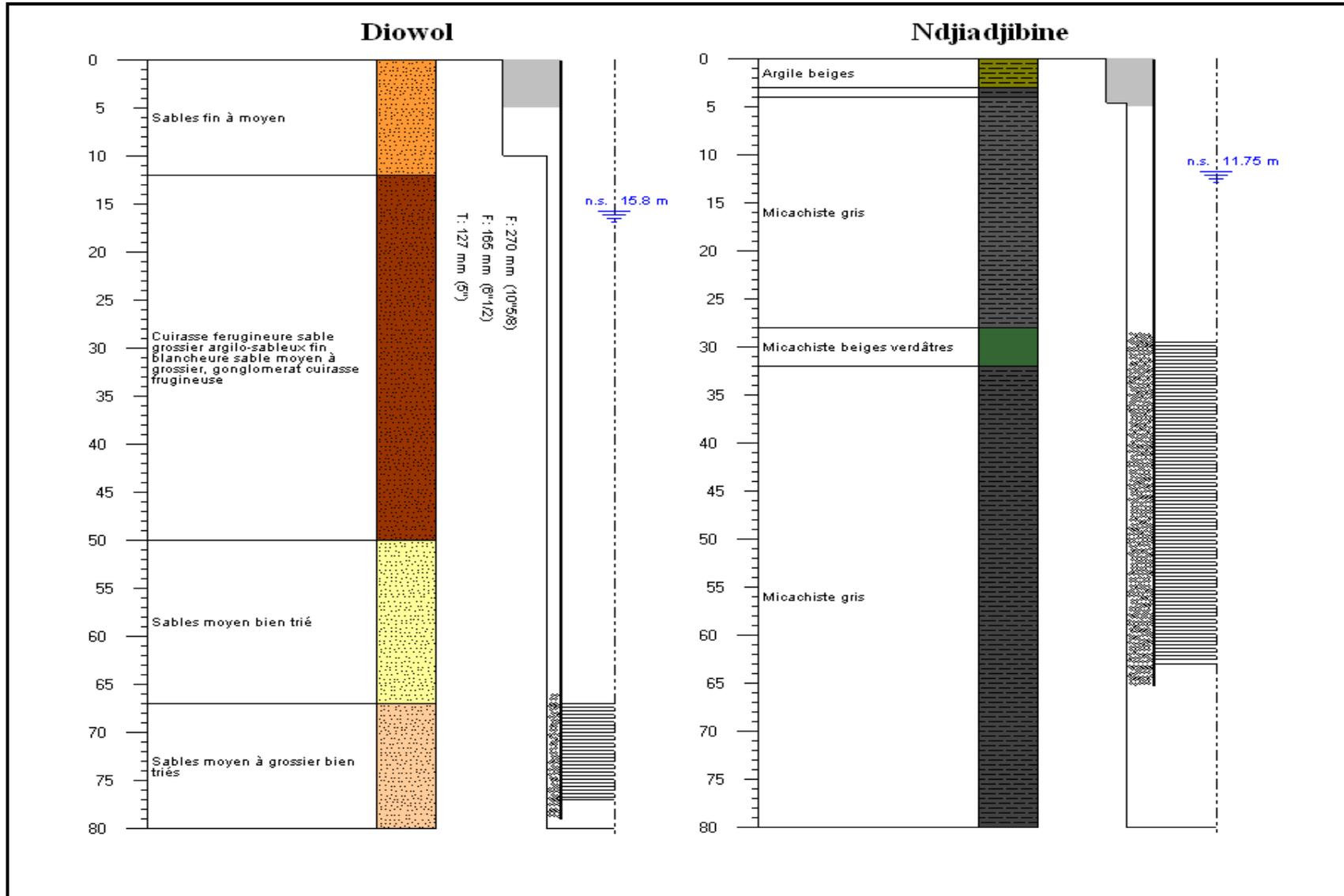


Figure 16 : Coupes lithologiques des forages de Diowol et de Ndjiadjibine

Le forage de Ndjiadjibine Gandéga est situé sur la bordure de l'important oued du même nom. Les formations géologiques en présence sont constituées par des schistes et phyllites pélitiques localement chloriteux (avec quartzites). Ces formations appartiennent à l'Arc des Mauritanides.

Le forage de Toufoundé Civé est situé sur la bordure du fleuve Sénégal. Les formations géologiques en présence sont constituées par des alluvions du fleuve qui repose sur les grès de l'Eocène du Bassin sédimentaire du Sud-ouest mauritanien.

2.2. Essais de débit par paliers simples

2.2.1. Par la méthode classique de Jacob

2.2.1.1. Courbe caractéristique [$s = f(Q)$]

Elle correspond à la construction d'une courbe rabattement / débit d'après la relation [$s = f(Q)$]. Cette courbe constitue un support indispensable pour détecter les améliorations ou les détériorations suite à l'exploitation de l'ouvrage dans le futur. Elle permet également de déterminer le débit optimum, fonction du rabattement maximal admissible qui est limité par le dénoyage du puits ou de la tête de crépine (Lauga, 1990).

Le débit critique représente la valeur au-delà de laquelle il apparaît des pertes de charges dans le sondage. Il correspond au point où la courbe caractéristique quitte l'allure linéaire pour prendre une forme parabolique. Il est noté Q_c et s'exprime en $m^3 \cdot h^{-1}$ (Castany, 1982).

C'est ainsi que dans la pratique, le débit de pompage doit être inférieur au débit critique. Parce qu'au-delà du débit critique apparaît un écoulement turbulent qui augmente les pertes de charges dans l'ouvrage. Cette augmentation peut provoquer une diminution du rendement de l'ouvrage et l'entraînement des particules fines du terrain, souvent à l'origine du colmatage de la partie captante et ensablement du forage (Castany, 1982).

Pour notre étude, ce débit critique n'est pas souvent atteint à cause des faibles débits exhaérés lors des réceptions provisoires (Figure 17). Les valeurs des rabattements calculées avec l'expression de Jacob sont proches de celles mesurées, donc l'expérience est bien faite et on peut calculer les pertes de charges linéaires et quadratiques (Tableau 1).

Tableau 1 : Essais de puits par paliers de débits de courtes durées dans les forages

Ouvrages	Q	s _{mes}	BQ	S = BQ + AQ ²	s/Q	Q/s
Agoynit	0,94	1,93	3,3	3,57	2,053	0,49
	1,03	2,32	3,62	3,93	2,252	0,44
	2,29	6,32	8,06	9,63	2,76	0,36
	3,43	11	12	15,6	3,207	0,31
Ajar Soninké (F1)	0,96	4,01	3,17	5,03	4,177	0,24
	0,97	4,09	3,211	5,1113	4,216	0,24
	1,71	9,63	5,561	11,262	5,632	0,18
	2,38	16,96	7,878	19,3192	7,126	0,14
Ajar Soninké (F2)	5,79	0,25	6,879	7,61	0,043	23,2
	5,8	0,3	7,346	8,18	0,052	19,3
	10,4	2,23	9,693	11,519	0,214	4,66
	18,9	5,11	16,2	20,3	0,27	3,7
Tachott	0,75	5,08	7,35	8,75	6,773	0,15
	0,76	5,43	7,44	8,89	7,145	0,14
	1,29	10,66	12,64	16,83	8,264	0,12
	1,87	17,91	18,32	26,64	9,578	0,1
Diowol	5,79	0,38	0,926	0,926	0,066	15,2
	5,8	0,38	0,928	0,928	0,066	15,3
	10,4	0,63	1,66	1,66	0,061	16,5
	18,9	1,13	3,024	3,024	0,06	16,7
Toufoundé Civé	4,16	0,22	0,208	0,208	0,053	18,9
	4,17	0,22	0,209	0,2085	0,053	19
	9,11	0,49	0,456	0,4555	0,054	18,6
	17,6	0,95	0,88	0,88	0,054	18,5
Ndjiadjibine	1,18	3,52	0,4	0,454	2,983	0,34
	1,26	3,83	0,41	0,475	3,04	0,33
	1,71	5,93	1,67	2,601	3,468	0,29
	2,78	10,74	3,147	6,403	3,863	0,26

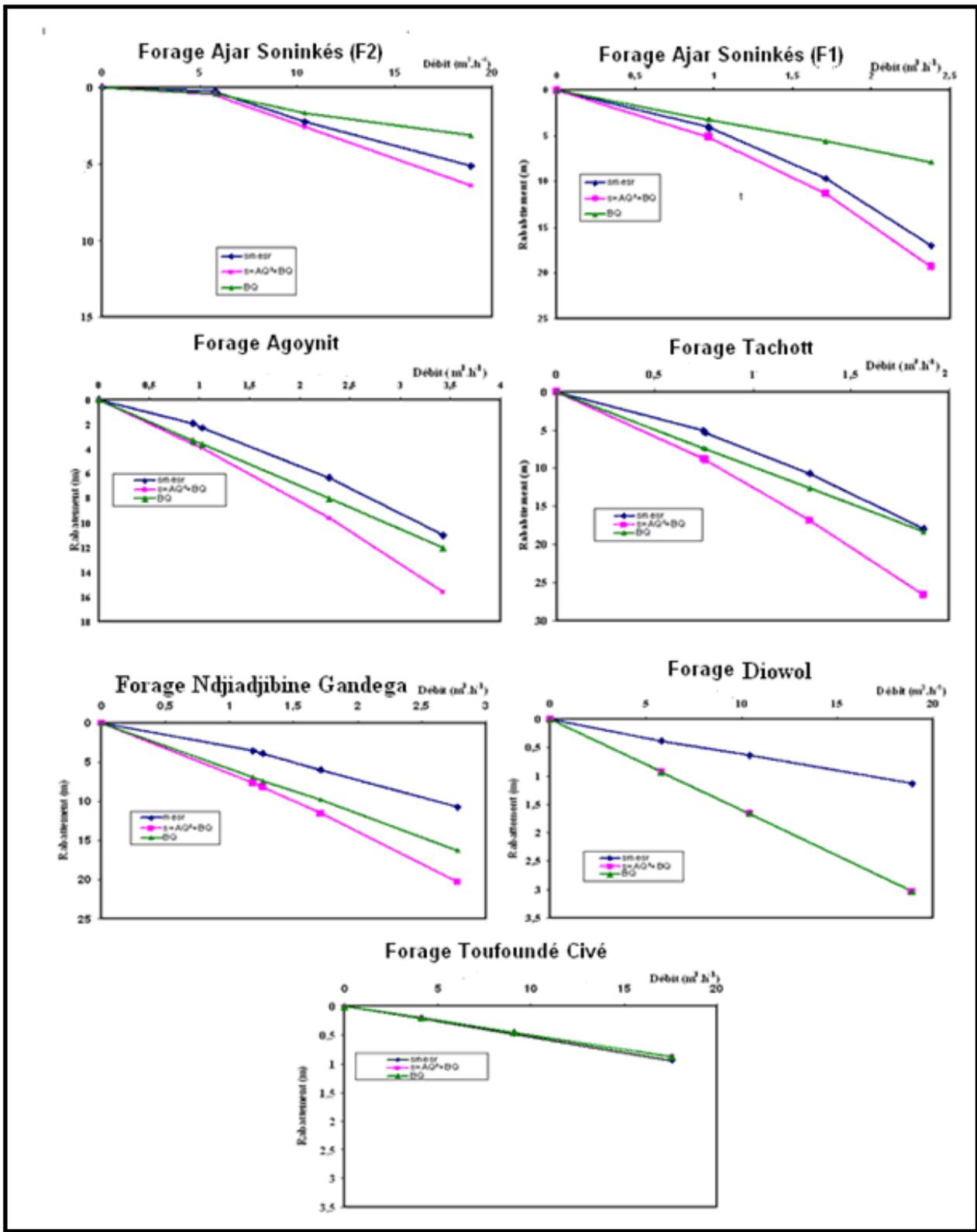


Figure 17: Courbes caractéristiques des forages (rabattement en fonction du débit : $[s = f(Q)]$)

2.2.1.2. Evaluation des pertes de charges par la méthode de Jacob [s/Q = f(Q)]

La réalisation technique d'un forage et de son dispositif de captage perturbe l'écoulement au voisinage de l'ouvrage. Ces diverses perturbations entraînent l'apparition, en période de pompage, d'une perte de charge supplémentaire qui s'ajoute à la perte de charge théorique qui serait imposée par le milieu poreux supposé capté dans les conditions idéales (Forkasiewicz, 1972).

L'évaluation du débit d'exploitation maximum d'un ouvrage hydraulique (puits villageois, forage et piézomètre) et le calcul des caractéristiques de l'ouvrage, passent obligatoirement par la détermination des pertes de charge qui seront provoquées par le pompage d'exploitation. Parmi ces pertes de charges, on distingue celles qui sont dues à la formation aquifère et celles causées par l'équipement de l'ouvrage hydraulique.

Dans l'ouvrage hydraulique, le rabattement mesuré à l'instant t est la somme de deux composantes exprimées en mètres de hauteur d'eau. Ces deux composantes sont :

- les pertes de charges linéaires (BQ) provoquées par l'écoulement laminaire dans l'aquifère au voisinage du puits;
- les pertes de charges quadratiques (CQ²), non linéaires, provoquées par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage, crépine et tubage.

Ainsi, le rabattement total à l'instant t est donné par l'expression de Jacob (1946) ci-dessous :

$$s \text{ (m)} = BQ + CQ^2$$

B : coefficient de perte de charge linéaire ;

C : coefficient de perte de charge quadratique ;

Q : débit de pompage en m³.h⁻¹.

A partir de cette expression, on peut exprimer le rabattement spécifique (s/Q) :

$$s/Q = B + CQ$$

Cette expression peut se mettre sous la forme d'une équation de droite de type $y = ax + b$.

a et b correspondent respectivement à la pente de la droite et à l'ordonnée à l'origine. Pour $x = 0 \Rightarrow y = b$. Par identification, $Q = x$ et $s/Q = y$.

Les constantes B et C sont déterminées directement sur la courbe $s/Q = f(Q)$, établie sur papier millimétré.

Le coefficient B est donné par l'intersection de la droite avec l'axe $[s/Q]$ et le coefficient A représente la pente de la droite. Ainsi, les courbes $s/Q = f(Q)$ des forages donnent des droites qui ne passent pas par l'origine (Fig. 18 à 21). Ceci traduit un régime turbulent et laminaire. Donc les pertes de charges ne sont pas nulles.

Le calcul des pertes de charge, montre que l'essentiel du rabattement observé au niveau des forages est dû aux pertes de charges linéaires (BQ). Les pertes de charge quadratiques (AQ^2) interviennent pour 7 à 23% (Agoynit), pour 12 à 51% (Ajar Soninké (F2)), pour 16 à 31% (Tachott), 11 à 25% (Ndjiadjibine) et nulle (0%) aux forages Diowol et Toufoundé Civé (localités de la région du Gorgol), du rabattement total observé.

Ces résultats expliquent respectivement la présence de la pente observée sur la courbe caractéristique de Ajar Soninké et l'absence de cette pente sur celle de Toufoundé Civé. Dans les forages, les pertes de charges linéaires croissent en fonction du débit de pompage (Tableau 2).

Tableau 2 : Récapitulation des essais par palier des forages

Ouvrages	Q(m ³ .h ⁻¹)	B	A	BQ	s _{scal} (m)	BQ/s(%)	AQ ² /s	AQ ² /BQ(%)
Agoynit	0,94	3,52	0,30	3,3	3,57	93	7	8
	1,03			3,62	3,93	92	8,00	9
	2,29			8,06	9,63	84	16,00	20
	3,43			12	15,6	77	23,00	29
Ajar Soninké (F1)	0,96	3,31	2,02	3,17	5,03	63	37,00	59
	0,97			3,2107	5,1113	63	37,00	59
	1,71			5,5608	11,262	49	51,00	103
	2,38			7,8778	19,3192	41	59,00	145
Ajar soninké (F2)	1,03	0,39	0,05	6,879	7,61	88	12,00	14
	1,07			7,3458	8,18	88	12,00	14
	4,30			9,693	11,519	64	36,00	55
	8,07			16,2	20,3	49	51,00	103
Tachott	0,75	9,80	2,50	7,35	8,75	84	16,00	19
	0,76			7,44	8,89	84	16,00	19
	1,29			12,64	16,83	75	25,00	33
	1,87			18,32	26,64	69	31,00	45
Diowol	5,79	0,16	0,00	0,926	0,926	100	0,00	0
	5,8			0,928	0,928	100	0,00	0
	10,09			1,66	1,66	97	0,00	0
	18,9			3,024	3,024	100	0,00	0
Toufoundé Civé	4,16	0,05	0,00	0,208	0,208	100	0,00	0
	4,17			0,2085	0,2085	100	0,00	0
	9,11			0,4555	0,4555	100	0,00	0
	17,6			0,88	0,88	100	0,00	0
Ndjiadjibine	1,18	5,83	0,53	0,4	0,454	90	10,00	11
	1,26			0,41	0,475	90	10,00	11
	1,71			1,67	2,601	87	13,00	16
	2,78			3,1473	6,403	80	20,00	25

2.2.1.3. Débit d'exploitation maximum des ouvrages

Le débit d'exploitation maximum d'un ouvrage correspond au débit qui peut être pompé dans l'ouvrage, pendant une durée définie, sans que le rabattement induit par le pompage ne dépasse le rabattement maximum admissible (Forkasiewicz, 1978). Or, pour être dans des conditions économiques données, le débit d'exploitation maximum et le rabattement correspondant doivent être inférieurs au débit critique.

Compte tenu du fait que le débit critique n'ait pas été atteint sur l'ensemble des forages textés, le débit d'exploitation maximum de ces forages doit être supérieur au débit de pompage du dernier essai par palier.

Les courbes caractéristiques obtenues montrent que le débit critique n'a pas été atteint aux forages d'Ajar Soninké (F2), Toufoundé Civé et Diowol. Les débits maximums d'exploitation seraient donc supérieurs au débit de pompage des derniers essais par palier soit $8,07 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Ajar Soninké (F2), $18,90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Diowol et $17,60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Toufoundé Civé.

Toutefois pour être dans des conditions économiques données, la perte de charge quadratique (CQ^2) ne doit pas être élevée par rapport à la perte de charge linéaire (BQ) (Castany, 1982). En général, on prend (CQ^2) de sorte qu'elle représente 25 % de (BQ).

Il reviendrait donc à évaluer d'une part, le pourcentage des deux types de pertes de charge par rapport aux pertes de charges totales et d'autre part, les pertes de charges quadratiques par rapport aux pertes de charges linéaires.

L'extrapolation raisonnable à partir de l'équation de Jacob [$s = BQ + CQ^2$] montre que cette condition est valable pour un débit de $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Agoynit. Cependant, le fait que le rabattement du forage d'Agoynit soit élevé (13,26 m), il serait judicieux d'estimer le débit d'exploitation maximum à $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour un rabattement 8,24 m.

Au forage Ajar Soninké (F2), le résultat obtenu ($2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) est contradictoire à l'hypothèse selon laquelle le débit maximum d'exploitation serait supérieur au débit du dernier essai par palier. En effet, ce manque d'homogénéité des résultats aurait pour origine les causes évoquées ci-dessus. Ces perturbations liées à l'expérimentation s'observent également sur la courbe [$s/Q = f(Q)$] par une dispersion des points qui rend aléatoire la détermination des valeurs de B et de C. Toute fois, nous retiendrons que le débit maximum d'exploitation à Ajar Soninké serait supérieur à $8,07 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Tableau 2).

Aux forages Diowol et Toufoundé Civé, l'essai étant bien réalisé on peut proposer après extrapolation raisonnable un débit de 60 et 80 m³.h⁻¹ pour un rabattement de 9,6 et 4 m (Tableau 3).

Tableau 3 : Récapitulation des essais de puits pour les différents forages

Ouvrages	Q(m ³ .h ⁻¹)	B	A	s _{cl} (m)	BQ/s(%)	AQ ² /BQ(%)
Agoynit	3,00	3,52	0,30	13,26	80,00	26,00
Ajar soninké (F1)	-	-	-	-	-	-
Ajar Soninké (F2)	2,00	0,39	0,05	0,98	80,00	26,00
Tachott	1,00	9,80	2,50	12,00	80,00	26,00
Diowol	60,00	0,16	0,00	9,60	100,00	0,00
Toufoundé Civé	80,00	0,05	0,00	4,00	100,00	0,00
Ndjiadjibine	2,78	5,83	0,53	20,00	80,00	25,00

2.2.2. Par la méthode d'essai normalisé

2.2.2.1. Courbe caractéristique [s = f(Q)]

Au cours de cette mission seuls les forages dont le débit obtenu est jugé supérieur à 2 m³.h⁻¹ avec des rabattements acceptables et présentant une eau de bonne qualité (conductivité électrique est inférieure à 1500 µS.cm⁻¹ conformément aux normes de l'OMS), ont fait l'objet de pompage par paliers enchaînés. Chaque ouvrage a fait l'objet d'un pompage par paliers de 3 paliers enchaînés de débit Q1, Q2 et Q3 de durée 2h, 1 h et 1 h suivi de l'observation de la remontée pendant 1 h (Fiche A, annexes 1). Ces pompages d'essai ont été effectués sur sept (07) forages dans la zone du Gorgol - Guidimakha en vue d'évaluer, pour chacun d'eux, ses possibilités d'exploitation (Fig. 18 à 21).

2.2.2.2. Détermination des débits d'exploitation des ouvrages

A partir des coefficients **A** et **B** calculés ci-dessus, l'équation de la droite caractéristique [s/Q = f(Q)] à 8 mois est : s/Q = AQ + B, qui s'écrit aussi : s = AQ²+BQ. Cette équation du second degré en **Q** a pour solution réelle :

$$Q = ((\sqrt{B^2 + 4.A.s}) - B)/2.A$$

Si l'on se fixe un rabattement maximum (s_{Max}) (Fiche B, partie 5), le débit maximum Q_{Max} autorisé pour ne pas rabattre au dessous de NDMAX s'écrit alors :

$$Q_{Max} = ((\sqrt{B^2 + 4.A.s_{Max}}) - B)/2.A$$

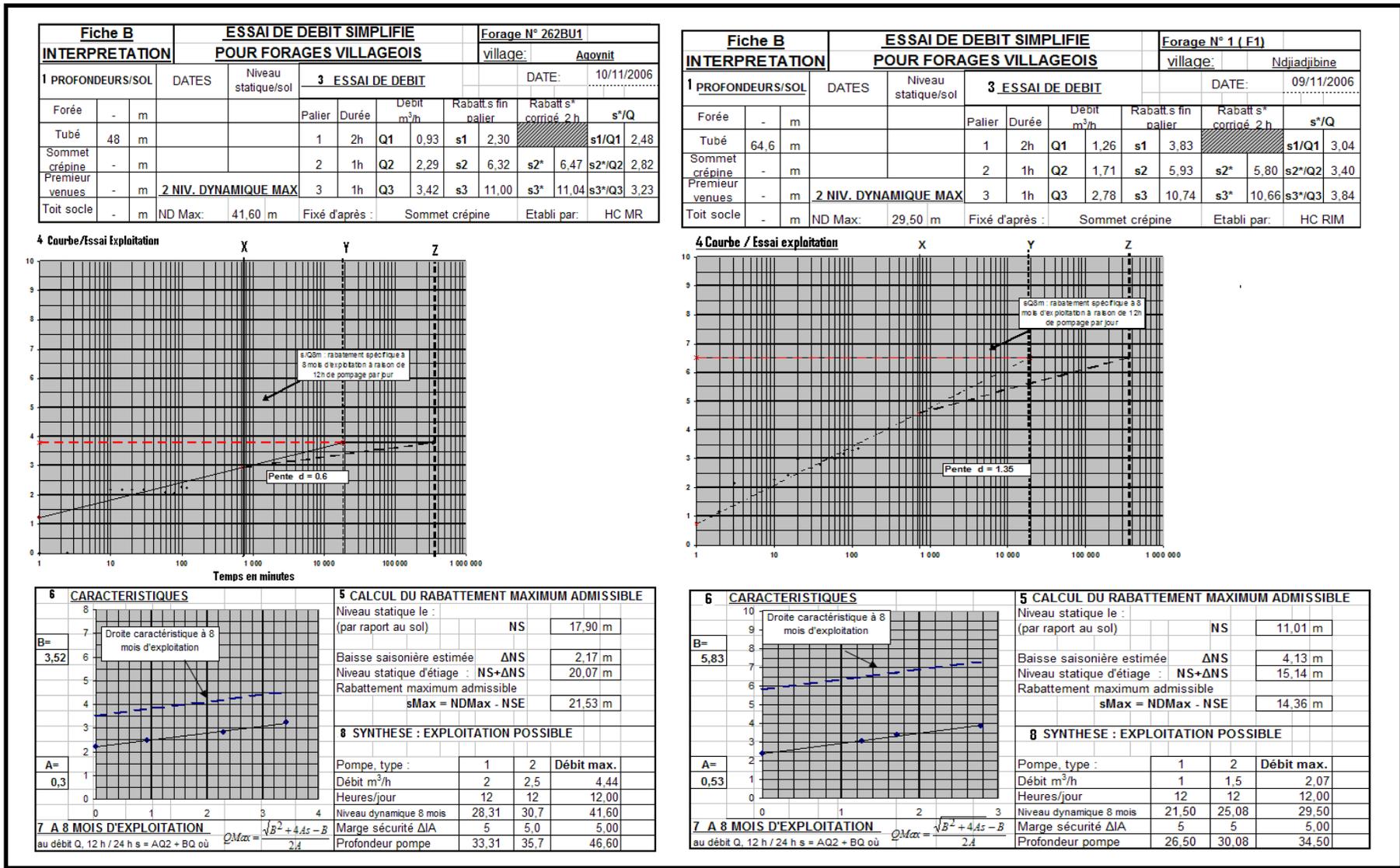
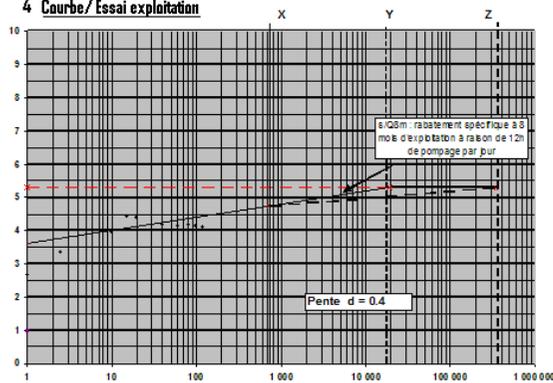


Figure 18 : Courbes caractéristiques des forages Agoymit et Ndjiadjibine à 8 mois d'exploitation

Fiche B		ESSAI DE DEBIT SIMPLIFIE						Forage N° 264BU1	
INTERPRETATION		POUR FORAGES VILLAGEOIS						village: Ajar Soninkés	
1 PROFONDEURS/SOL		DATES		Niveau statique/sol		3 ESSAI DE DEBIT			
						DATE: 21/11/2006			
Forée	-	m		Palier	Durée	Debit m ³ /h	Rabatt s fin palier	Rabatt s* corrigé 2 h	s*/Q
Tubé	35,7	m		1	2h	Q1 0,99	s1 4,09	s1/Q1	4,15
Sommet crépine	-	m		2	1h	Q2 1,71	s2 9,63	s2*/Q2	5,62
Premier venues	-	m	2 NIV. DYNAMIQUE MAX	3	1h	Q3 2,39	s3 16,69	s3*/Q3	6,97
Toit socle	-	m	ND Max: 30,00 m	Fixé d'après: Sommet crepine		Etabli par: HC RIM			

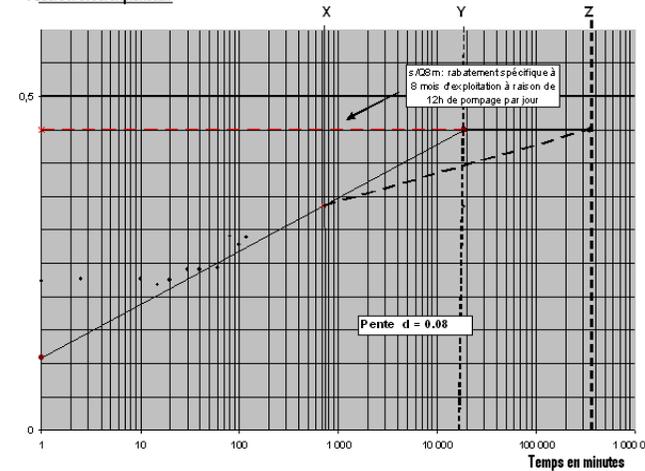
4 Courbe/ Essai exploitation



6 CARACTERISTIQUES		5 CALCUL DU RABATTEMENT MAXIMUM ADMISSIBLE	
Droite caractéristique à 8 mois d'exploitation		Niveau statique le: (par rapport au sol) NS 4,59 m	
B= 3,31		Baisse saisonnière estimée ΔNS 6,35 m	
		Niveau statique d'étiage: NS+ΔNS 10,94 m	
		Rabattement maximum admissible sMax = NDMax - NSE 19,06 m	
8 SYNTHÈSE : EXPLOITATION POSSIBLE			
A= 2,02		Pompe_type:	1 2 Débit max.
		Débit m ³ /h	1,5 2 2,36
		Heures/jour	12 12 12,00
		Niveau dynamique 8 mois	20,44 25,62 30,00
		Marge sécurité ΔIA	5 5 5,00
7 A 8 MOIS D'EXPLOITATION		Profondeur pompe	
au débit Q, 12 h / 24 h s = AQ2 + BQ où $Q_{Max} = \frac{\sqrt{B^2 + 4As} - B}{2A}$		25,44 30,62 35,00	

Fiche B		ESSAI DE DEBIT SIMPLIFIE						Forage N° 1J2071	
INTERPRETATION		POUR FORAGES VILLAGEOIS						village: Ajar Soninkés	
1 PROFONDEURS/SOL		DATES		Niveau statique/sol		3 ESSAI DE DEBIT			
						DATE: 19/11/2006			
Forée	-	m		Palier	Durée	Debit m ³ /h	Rabatt s fin palier	Rabatt s* corrigé 2 h	s*/Q
Tubé	53,1	m		1	2h	Q1 1,07	s1 0,30	s1/Q1	0,28
Sommet crépine	-	m		2	1h	Q2 4,3	s2 2,23	s2*/Q2	0,53
Premier venues	-	m	2 NIV. DYNAMIQUE MAX	3	1h	Q3 8,07	s3 5,11	s3*/Q3	0,64
Toit socle	-	m	ND Max: 13,00 m	Fixé d'après: Sommet crépine		Etabli par: HC RIM			

4 Courbe/ Essai exploitation



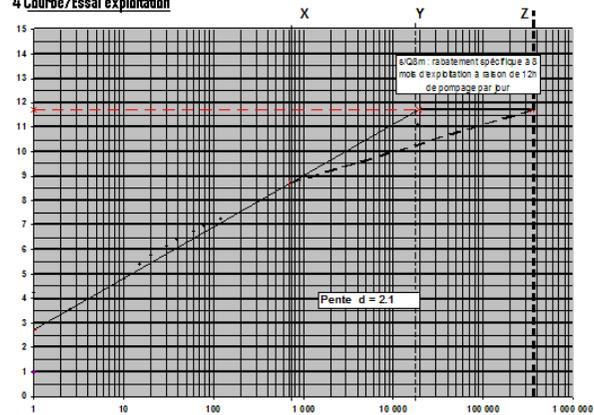
6 CARACTERISTIQUES		5 CALCUL DU RABATTEMENT MAXIMUM ADMISSIBLE	
Droite caractéristique à 8 mois d'exploitation		Niveau statique le: (par rapport au sol) NS 5,06 m	
B= 0,39		Baisse saisonnière estimée ΔNS 6,71 m	
		Niveau statique d'étiage: NS+ΔNS 11,77 m	
		Rabattement maximum admissible sMax = NDMax - NSE 1,23 m	
8 SYNTHÈSE : EXPLOITATION POSSIBLE			
A= 0,05		Pompe_type:	1 2 Débit max.
		Débit m ³ /h	1,5 2 2,38
		Heures/jour	12 12 12,00
		Niveau dynamique 8 mois	12,48 12,77 13,00
		Marge sécurité ΔIA	5 5 5,00
7 A 8 MOIS D'EXPLOITATION		Profondeur pompe	
au débit Q, 12 h / 24 h s = AQ2 + BQ où $Q_{Max} = \frac{\sqrt{B^2 + 4As} - B}{2A}$		17,48 17,77 18,00	

Figure 19 : Courbes caractéristiques des forages Ajar Soninké (F1) et (F2) à 8 mois d'exploitation

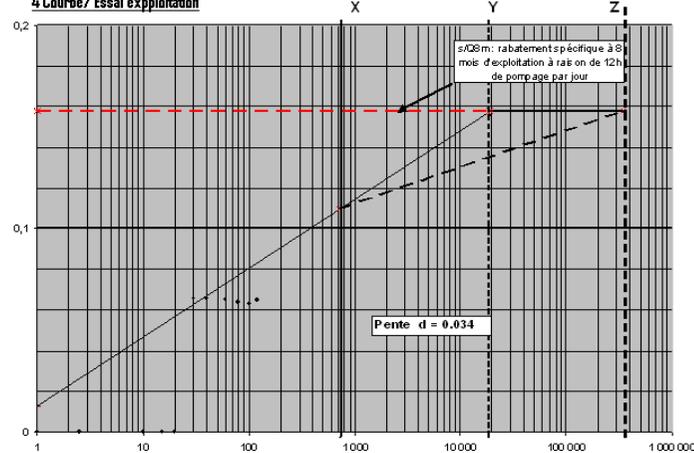
Fiche B		ESSAI DE DEBIT SIMPLIFIE				Forage N° F-2 SE-15B	
INTERPRETATION		POUR FORAGES VILLAGEOIS				village:	Tachott
1 PROFONDEURS/SOL	DATES	Niveau statique/sol	3 ESSAI DE DEBIT			DATE:	14/11/2006
Forée	-	m	Palier	Durée	Debit m³/h	Rabatt.s fin palier	Rabatt.s* corrigé 2 h
Tubé	43,7	m	1	2h	Q1 0,76	s1 5,43	s1/Q1 7,12
Sommet crépine	-	m	2	1h	Q2 1,29	s2 10,66	s2* 10,71 s2*/Q2 8,28
Premieur venues	-	m	3	1h	Q3 1,82	s3 17,91	s3* 17,76 s3*/Q3 9,76
Toit socle	-	m	ND Max:	27,00 m	Fixé d'après :	Sommet crépine	Etabli par: HC RIM

Fiche B		ESSAI DE DEBIT SIMPLIFIE				Forage N° 1 (F1)	
INTERPRETATION		POUR FORAGES VILLAGEOIS				village:	DIOWOL
1 PROFONDEURS/SOL	DATES	Niveau statique/sol	3 ESSAI DE DEBIT			DATE:	28/11/2006
Forée	80	m	Palier	Durée	Debit m³/h	Rabatt.s fin palier	Rabatt.s* corrigé 2 h
Tubé	79	m	1	2h	Q1 5,8	s1 0,37	s1/Q1 0,06
Sommet crépine	-	m	2	1h	Q2 10,4	s2 0,63	s2* 0,64 s2*/Q2 0,06
Premieur venues	-	m	3	1h	Q3 18,9	s3 1,13	s3* 1,16 s3*/Q3 0,06
Toit socle	-	m	ND Max:	30,00 m	Fixé d'après :		Etabli par: HC MR

4 Courbe/Essai exploitation



4 Courbe/ Essai exploitation



6 CARACTERISTIQUES		5 CALCUL DU RABATTEMENT MAXIMUM ADMISSIBLE	
B=	9,80	Niveau statique le : (par raport au sol)	NS 3,70 m
A=	2,5	Baisse saisonière estimée	ΔNS 7,32 m
Droite caractéristique à 8 mois d'exploitation		Niveau statique d'étiage : NS+ΔNS	11,02 m
		Rabattement maximum admissible	sMax = NDMax - NSE 15,98 m
8 SYNTHESE : EXPLOITATION POSSIBLE			
		Pompe, type :	1 2 Débit max.
		Débit m³/h	0,7 1 1,24
		Heures/jour	12 12 12,00
		Niveau dynamique 8 mois	19,10 23,31 27,00
		Marge sécurité ΔIA	5 5 5,00
		Profondeur pompe	24,10 28,31 32,00

6 CARACTERISTIQUES		5 CALCUL DU RABATTEMENT MAXIMUM ADMISSIBLE	
B=	0,16	Niveau statique le : (par raport au sol)	NS 15,96 m
A=	0,000	Baisse saisonière estimée	ΔNS 2,52 m
Droite caractéristique à 8 mois d'exploitation		Niveau statique d'étiage : NS+ΔNS	18,48 m
		Rabattement maximum admissible	sMax = NDMax - NSE 11,52 m
8 SYNTHESE : EXPLOITATION POSSIBLE			
		Pompe, type :	1 2 Débit max.
		Débit m³/h	12 15 80,44
		Heures/jour	12 12 12,00
		Niveau dynamique 8 mois	20,36 20,82 30,00
		Marge sécurité ΔIA	5 5 5,00
		Profondeur pompe	25,36 25,82 35,00

Figure 20 : Courbes caractéristiques des forages Tachott et Diowol à 8 mois d'exploitation

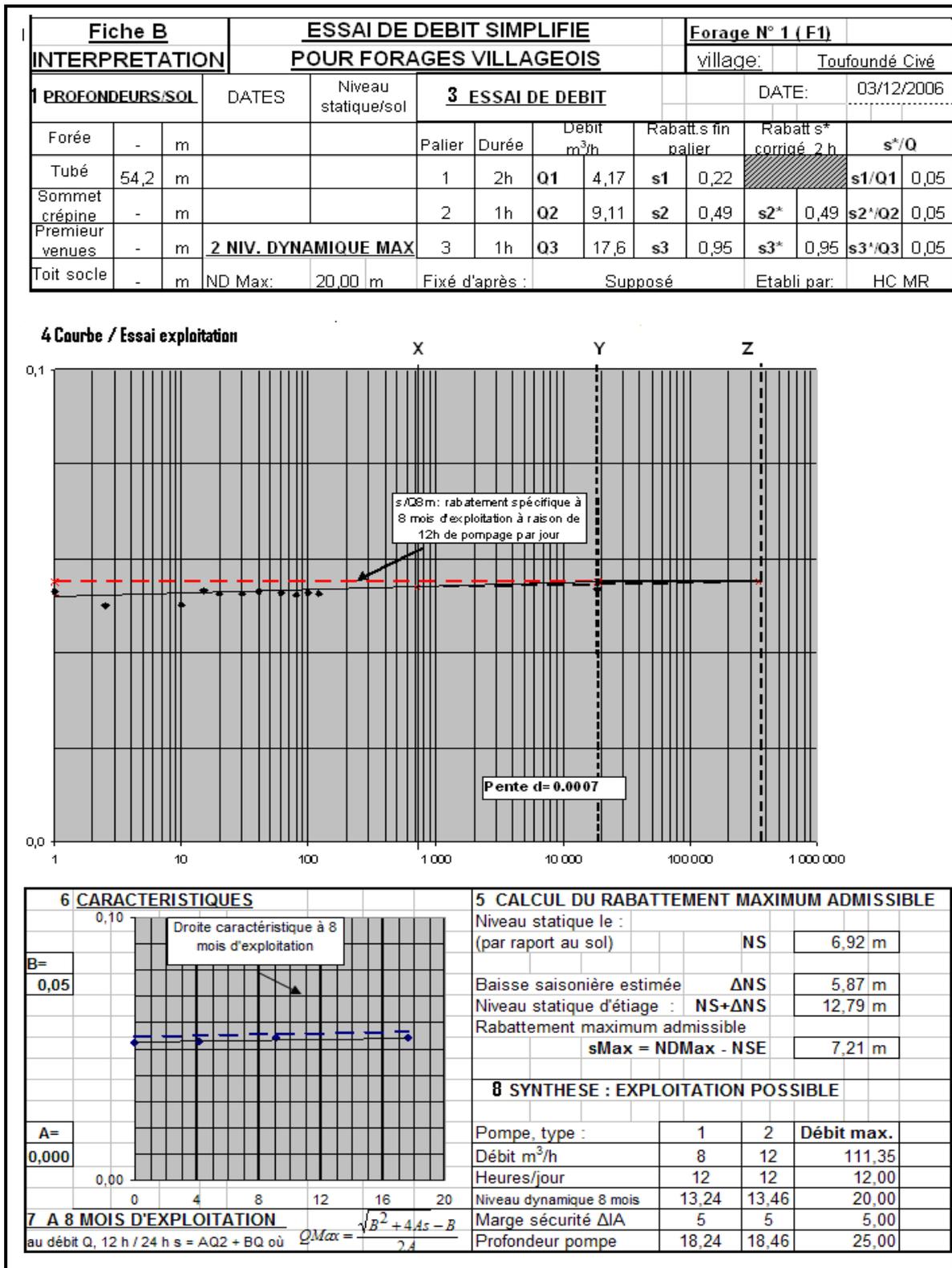


Figure 21 : Courbe caractéristique du forage de Toufoundé Civé à 8 mois d'exploitation

Les résultats des pompages par paliers sont reportés sur la fiche A en annexes. Pour ce qui est des forages testés, le débit d'exploitation est très variable d'un centre à l'autre suivant le contexte géologique et hydrogéologique (Tableau 4).

Tableau 4 : Résultats du développement des forages

Localités	A	B	Q_{\max} $m^3 \cdot h^{-1}$	S_{\max} (m)	Q_{\exp} $m^3 \cdot h^{-1}$	$S_{\text{correspond}}$ (m)	Profondeur d'installation des crépines
Agoynit	0,05	0,39	4,4	21,53	2	8,24	33
Ajar Soninké (F1)	2,02	3,31	2,4	19,06	1,5	9,5	29,5
Ajar Soninké (F2)	2,4	0,39	2,4	1,23	2	1	24
Diowol	0,00	0,16	80	11,52	12	1,88	26
Ndjajidine	0,53	5,83	2,1	14,36	1	6,36	28,80
Tachott	2,5	9,8	1,2	15,98	0,7	8,08	
Toufoundé Civé	0,00	0,05	111	7,21	12	0,67	20

Au cours de cette campagne de pompages d'essai, les forages de Tachott, d'Ajar Soninké (F1) et de Ndjiadjibine sont négatifs et en effet, vu les rabattements élevés correspondant respectivement 15,98, 19,06 et 14,36 m, ces forages ne peuvent être exploités par un système motorisé.

Pour les forages d'Agoynit et d'Ajar Soninké (F2), on préconise d'exploiter ces forages au maximum 8 heures par jour à cause des rabattements qui ne sont pas élevés.

Par contre, les forages à grand débit, comme Diowol et Toufoundé Civé, les débits d'exploitation préconisés sont de $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour des rabattements de 1,88 et 0,67 à cause de la présence des arrivées de sables très fins lors des pompages qui ne se sont pas arrêtées tout au long de ces essais. Ce débit couvre largement les besoins des villages à court et moyen terme.

Les résultats obtenus par les deux méthodes (la méthode classique et la méthode d'essai normalisé) aboutissent aux mêmes conclusions bien que les valeurs des débits et rabattements obtenues sont différentes. Mais dans le cas d'une étude de simulation du débit d'exploitation maximum, la méthode dite « d'essai normalisé » serait la mieux indiquée. En effet, dans cette méthode la durée de la simulation est fixée et connue par rapport à la méthode classique où la simulation se fait en tenant compte du débit de pompage et du rabattement.

2.3. Essais de longue durée à débit constant

Les forages qui ont eu des débits d'exploitation supérieurs à $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ont fait l'objet d'un essai de longue durée pendant 24 heures ou « essai de nappe » suivi de la remontée pendant 6 heures. Les résultats ont été interprétés par la méthode semi logarithmique de Jacob (Tableau 5).

Ainsi, à l'aide du résultat de pompage longue durée à débit constant et suivit de la remontée, nous avons pu déterminer les transmissivités des forages pompés au cours de la descente et à la remontée par la méthode de Jacob. Dans la mesure où nous ne disposons pas de piézomètres, il n'a pas été possible de calculer les coefficients d'emmagasinement (Fig. 22 à 24).

Tableau 5 : valeurs de transmissivité obtenues avec la méthode semi-logarithmique

Localités	$Q_{\text{long durée}}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	$S_{\text{correspond final}}$ (m)	s_r	T_{decente}	$T_{\text{remontée}}$	T_{retenue}
Agoynit	2,76	8,62	0,24	6×10^{-4}	7×10^{-4}	7×10^{-4}
Ajar Soninké(F1)	2,05	12,92	0	1×10^{-3}	5×10^{-4}	5×10^{-4}
Ajar Soninké F2	6,03	4,62	0,30	$3,6 \times 10^{-4}$	3×10^{-4}	3×10^{-4}
Diowol	18,87	1,13	0,03	$2,4 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-2}$	3×10^{-2}
Ndjiadjibine	2,41	11,78	1,28	$5,5 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}
Toufoundé Civé	18	0,95	0,03	$2,3 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-2}$	2×10^{-2}

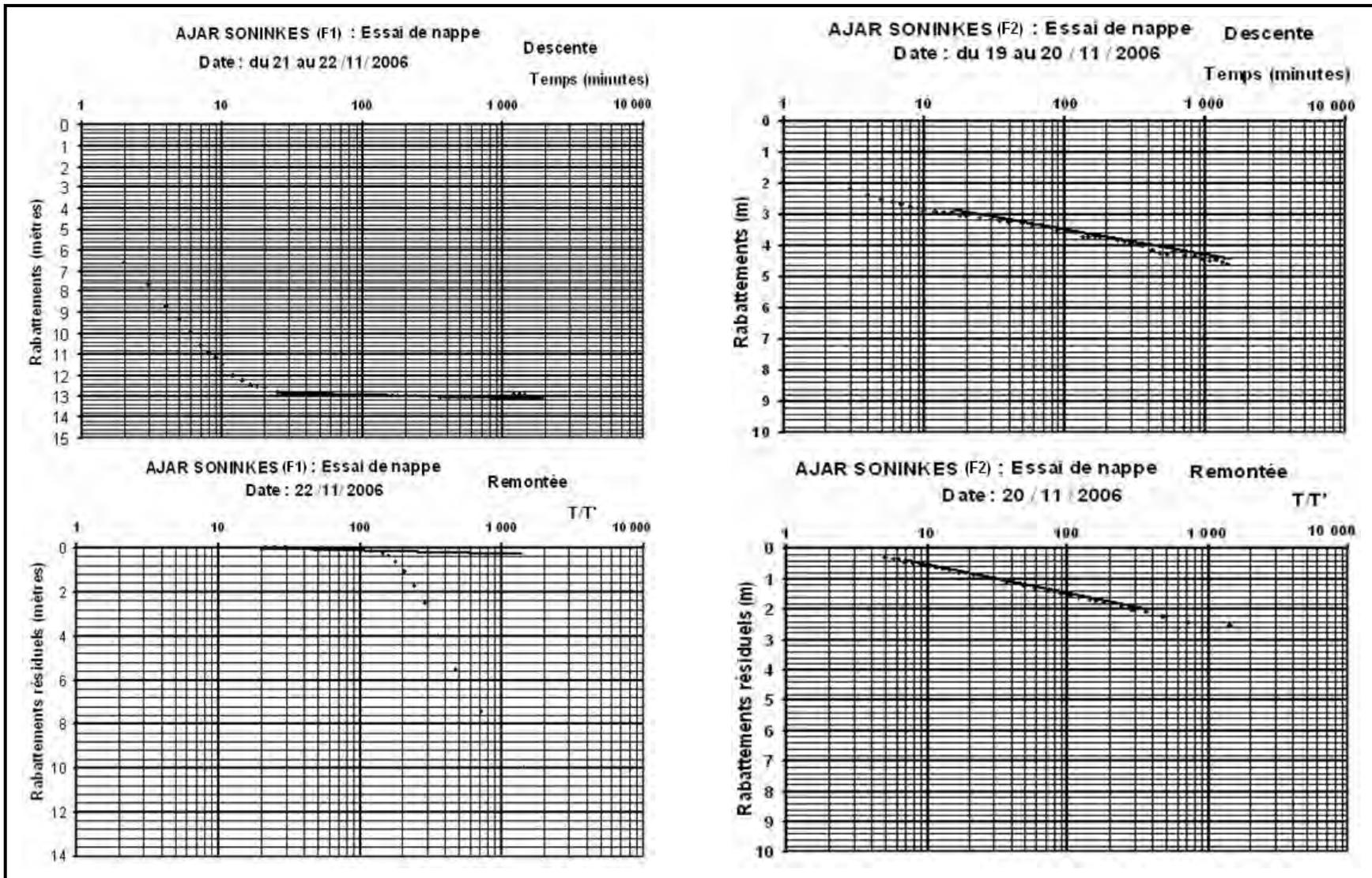


Figure 22 : Détermination de la transmissivité par la méthode semi-logarithmique de Jacob

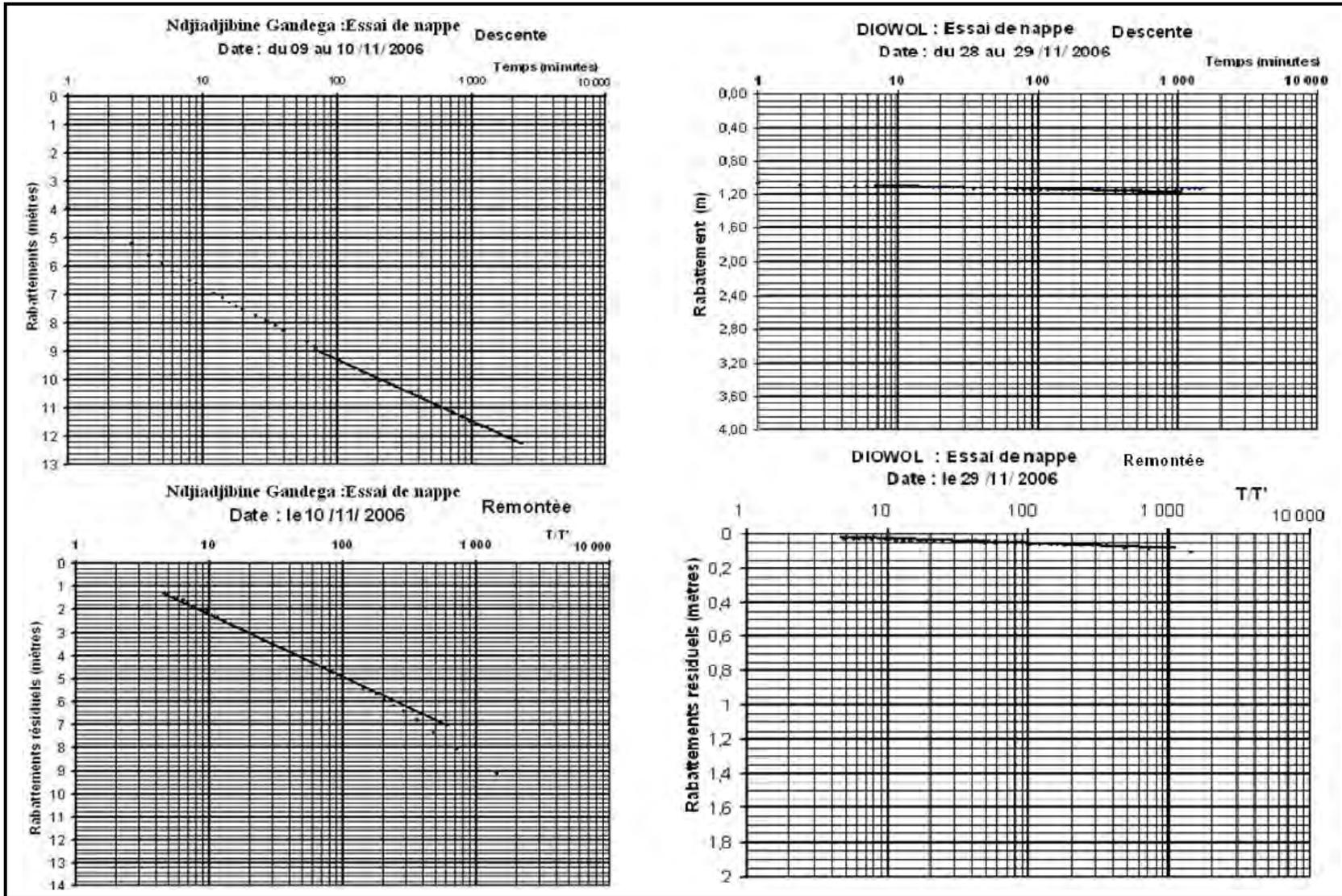


Figure 23 : Détermination de la transmissivité par la méthode semi-logarithmique de Jacob

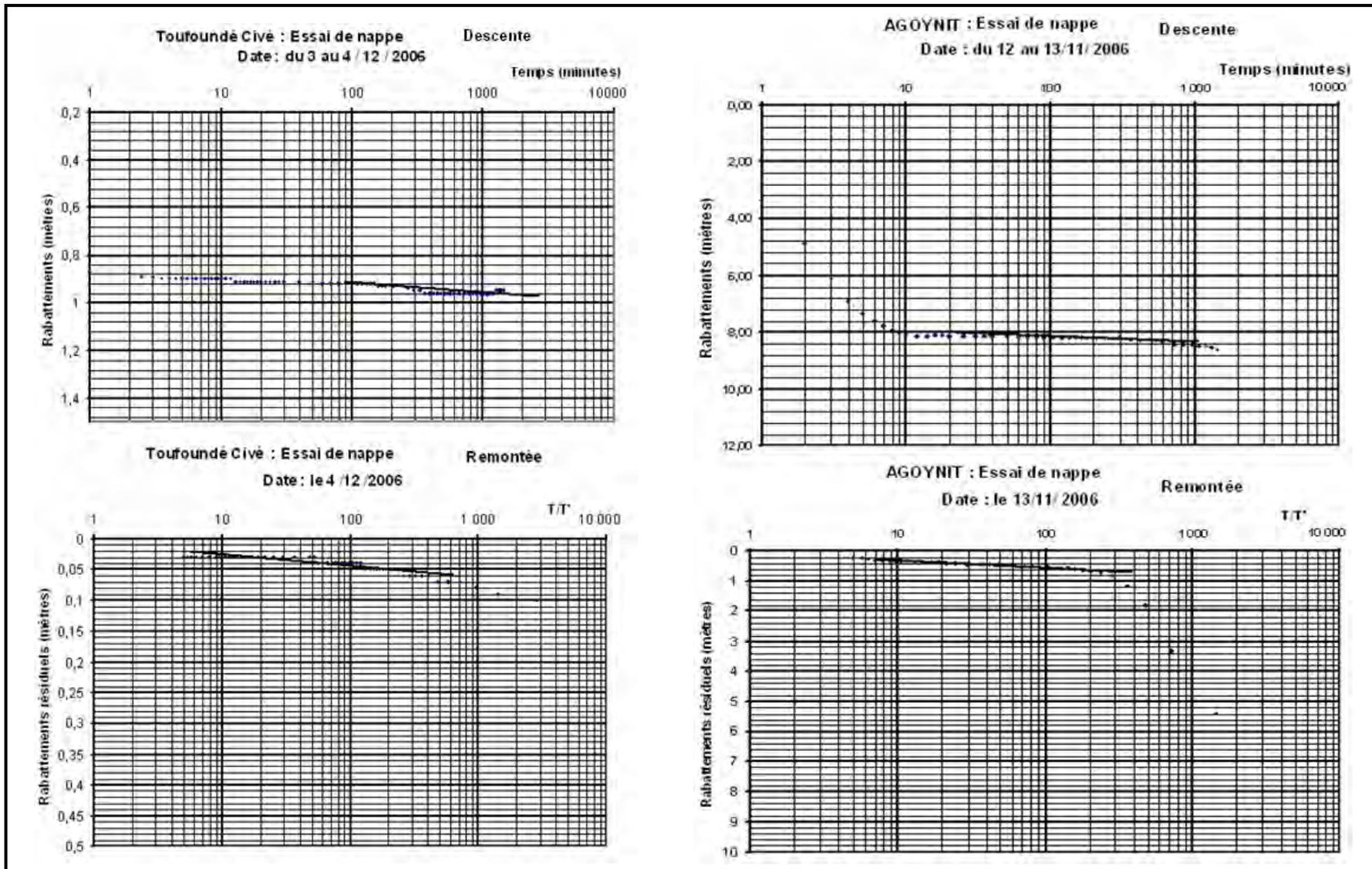


Figure 24 : Détermination de la transmissivité par la méthode semi-logarithmique de Jacob

3. HYDROCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES

Pendant la campagne des essais de pompage, des échantillons d'eau ont été prélevés dans les différents forages à l'aide d'un tuyau de refoulement muni d'une vanne réglant le débit et d'un tube de Pitot à son extrémité pour des fins d'analyses chimiques au laboratoire d'analyses physico-chimiques des eaux de l'Institut National de Recherches en Santé Publique (I.N.R.S.P.) de Nouakchott en Mauritanie.

Les paramètres physiques comme le pH, la température et la conductivité électrique ont été mesurés sur le terrain à partir d'un pH-mètre à microprocesseur WTW 196 et d'un conductimètre à microprocesseur WTW196 LF.

Au laboratoire de l'I.N.R.S.P., les analyses des échantillons d'eau ont été effectués systématiquement sur les éléments chimiques : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ pour les cations et Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} et NO_3^- pour les anions par des méthodes volumiques et spectrométriques :

- le calcium et le magnésium sont dosés simultanément par la méthode volumique complexométrique à l'E.D.T.A. ;
- les chlorures par la méthode volumique argentimétrique de Moher ;
- les teneurs en carbonates et en bicarbonates par un dosage volumique acido-basique ;
- les sulfates sont dosés par la méthode néphélométrique au chlorure de baryum sur un spectrophotomètre Spectronic 20 D Milton Roy Compagny ;
- les concentrations en sodium et en potassium, par spectrophotomètre de flamme sur un photomètre JENWAY PEP 7 ;
- le dosage des nitrates, de nitrites, de l'ammoniaque, et du fer est réalisé par colorimétrie, respectivement au salicylate de sodium, au réactif de Zambelli, à l'hypochlorite de Sodium et à l'orthophénanthroline. Les concentrations de ces éléments sont déterminées avec une précision comprise entre 2 et 4 %. Les mesures colorimétriques et néphélométrique sont effectuées sur un spectrophotomètre Spectronic 20 D Milton Roy Compagny qui présente une erreur de mesure de l'ordre 2% ;

3.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les caractéristiques physiques des eaux qui font l'objet de cette étude, se résument à un certain nombre de paramètres tels que le pH, la température et la conductivité électrique. Les mesures de ces paramètres ont été réalisées *in situ* en même temps que les prélèvements

d'échantillons d'eau pour les analyses chimiques. Les résultats de ces paramètres physico-chimiques, sont consignés en annexes (voir annexe 2).

3.1.1. Conductivité électrique et minéralisation totale

La minéralisation totale d'une eau peut être évaluée par sa conductivité électrique (CE en $\mu\text{S.cm}^{-1}$) ou par le taux de solides dissous (TDS en mg.l^{-1}). Ces deux paramètres dépendent de la quantité d'ions contenus dans cette eau. Les valeurs de conductivités électriques mesurées en 2006, varient de $70 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (Toufoundé Civé) à $1156 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (Ajar Soninké F2). Les eaux souterraines dans la zone d'étude sont donc faiblement à moyennement minéralisées.

En fonction des valeurs du TDS, on peut distinguer : les eaux douces ($\text{TDS} < 1000 \text{ mg.l}^{-1}$) ; les eaux saumâtres ($1000 < \text{TDS} < 10\ 000 \text{ mg.l}^{-1}$) ; les eaux salines ($10\ 000 < \text{TDS} < 100\ 000 \text{ mg.l}^{-1}$) et les saumures ($\text{TDS} > 100\ 000 \text{ mg.l}^{-1}$) (Banton et *al.*, 1995).

Les valeurs de la minéralisation des eaux souterraines dans la zone de Gorgol - Guidimakha sont dans l'ordre de $66,34$ à $876,88 \text{ mg.l}^{-1}$ (Tableau 6) ; ces eaux sont donc dans l'ensemble douces ($\text{TDS} < 1000 \text{ mg.l}^{-1}$).

3.1.2. Les températures

Pour l'année 2006, les valeurs de la température des eaux varient de $21,10^\circ\text{C}$ (Ajar Soninké F2) à $27,40^\circ\text{C}$ (Ajar Soninké F1 et Diaguili) et de $32,50^\circ\text{C}$ (Ajar Soninké F1, Agoynit, Woulbouni Maur, Diowol et Toufoundé Civé) à $34,50^\circ\text{C}$ (Mbedy Asagha) pour les mesures de l'année 2001. Ces valeurs sont proches de celles des températures moyennes de l'air ambiant.

3.1.3. Le pH

Toutes les mesures de ce paramètre de la campagne de 2006 sont comprise entre $6,68$ (Toufoundé Civé) et $8,29$ (Woulbouni Soninké F2) et celles de 2001 entre $6,22$ (Mbedy Asagha) et $7,37$ (Ndjiadjibine). Ces valeurs de pH, indiquent que les eaux sont neutres à légèrement basiques et que l'alcalinité des eaux, est contrôlée essentiellement par les ions bicarbonates (HCO_3^-).

3.1.4. Typologie des eaux

Pour faire ressortir les faciès chimiques des eaux souterraines dans la région de Gorgol - Guidimakha, les données des analyses chimiques de la campagne de l'année 2006, ont été reportées dans le diagramme triangulaire de Piper (Fig. 25). Globalement deux familles chimiques sont représentées dans les eaux souterraines des forages échantillonnés dans la zone du Gorgol - Guidimakha : les eaux chloruro-sulfatées calciques et magnésiennes et les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes.

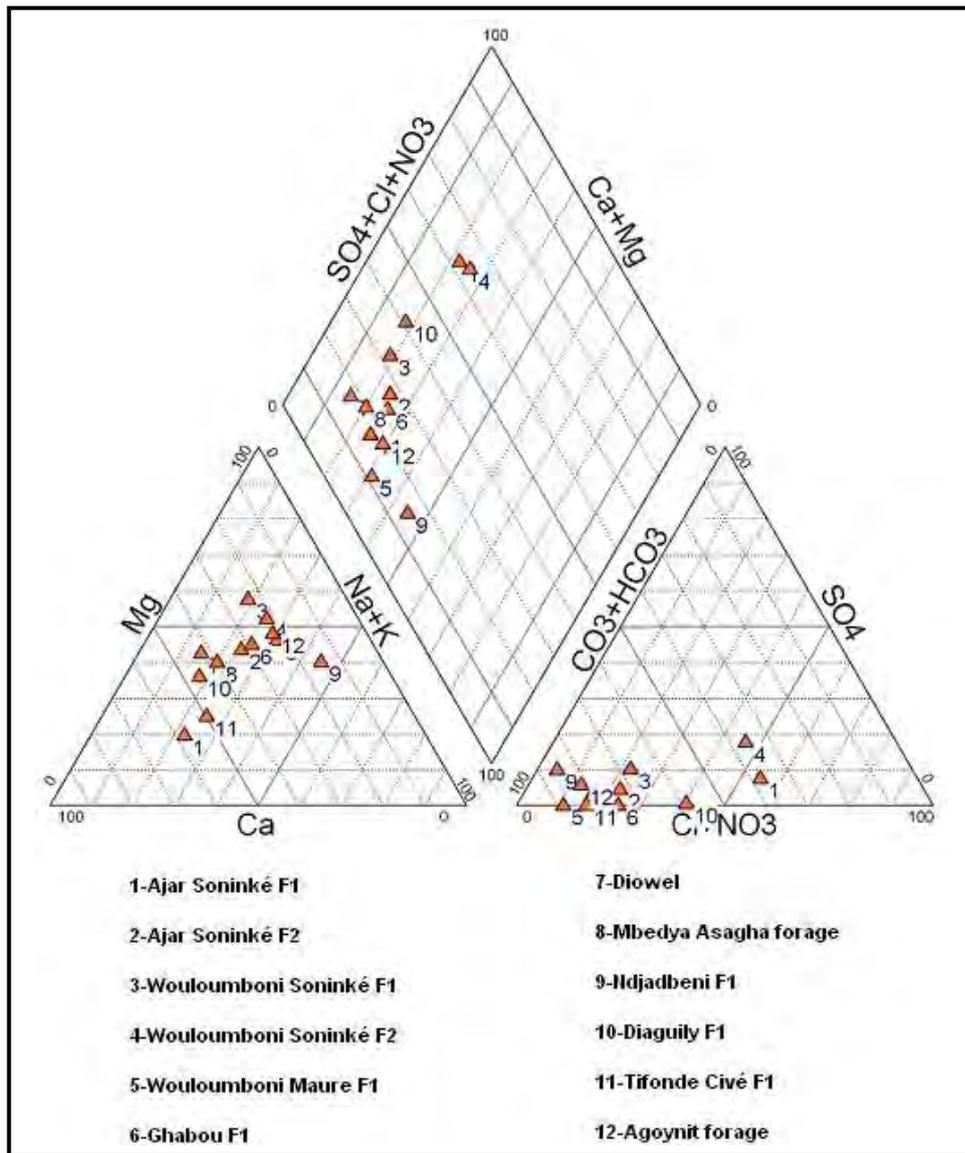


Figure 25 : Diagramme de Piper pour les eaux souterraines dans la zone du Gorgol - Guidimakha (campagne 2006)

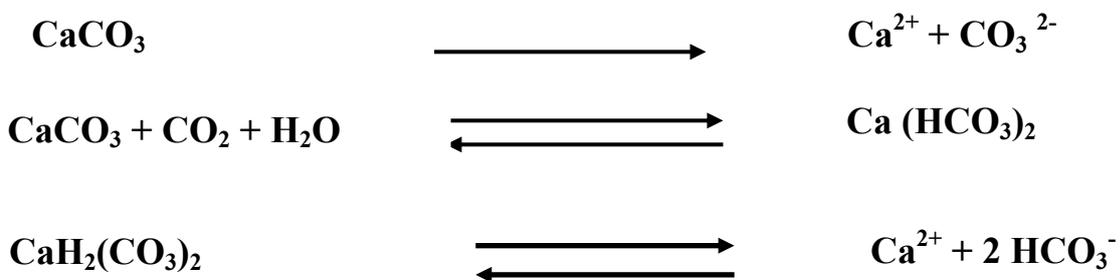
- Les eaux chloruro-sulfatés calciques et magnésiennes se répartissent en deux faciès : un faciès chloruré calcique (Forage d'AJAR Soninké F1) et un faciès chloruro-sulfaté magnésien (Forage de Wouloumboni Soninké F2).

- Les eaux bicarbonatés calciques et magnésiennes s'individualisent en faciès bicarbonaté calcique et magnésien (forages AJAR Soninké F2, Agoynit Forage, Toufoundé Civé, Diaguily, Ndjiadjibine, Mbedya Asagha, Diowol, Ghabou, Wouloumboni Maur, Wouloumboni Sn F1). Ce faciès est le plus représentatif des points d'eau échantillonnés et trouverait son origine par la dissolution des minéraux carbonatés présents dans la matrice de l'aquifère (Aragonite, calcite, dolomite et magnésite) qui entraînent la solubilisation des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- .

3.2. Etude de l'agressivité des eaux souterraines

3.2.1. Equilibre calco - carbonique

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines jouent un rôle important dans le choix du matériel d'équipement des forages. C'est ainsi que la mesure de certains paramètres tels que le pH d'équilibre, le CO_2 libre, peut nous aider à choisir le matériel adéquat pour l'équipement des ouvrages de captage. Le principal paramètre est le carbonate de calcium (CaCO_3) dont l'équilibre dans l'eau est soumis à des interactions avec le dioxyde de carbone (CO_2) suivant les réactions ci-dessous (Tardat-Henry, 1984) :



D'après les réactions ci-dessus, les bicarbonates et les carbonates ne peuvent exister en solution qu'en présence d'une certaine quantité de gaz carbonique libre, suffisante pour maintenir cet équilibre : c'est le gaz carbonique équilibrant. Si le CO_2 libre est supérieur au CO_2 équilibrant, l'eau est agressive et peut attaquer les conduites. Si le CO_2 est partiellement éliminé (variation de la température, de la pression, dégazage) la concentration en CO_2 peut devenir inférieure à celle du CO_2 équilibrant : l'équilibre est alors rompu, le bicarbonate se décompose en donnant du carbonate et si la concentration en celui-ci atteint la valeur du produit de solubilité, il va précipiter : l'eau est incrustante ou entartante.

3.2.2. Détermination du pH d'équilibre ou pH de saturation des eaux

Le pH d'équilibre d'une solution est le pH que la solution devrait avoir à l'équilibre avec la même composition chimique. Une eau en équilibre sur le plan calco-carbonique est une eau exactement saturée en CaCO_3 ; au contact de CaCO_3 , cette eau n'aura donc pas tendance à en dissoudre qu'elle n'a en déposer. Elle contient la quantité de CO_2 nécessaire et juste suffisante pour maintenir en solution le Ca^{2+} qu'elle contient sous forme de bicarbonate, ce que l'on exprime en général par l'équilibre (Bontoux, 1983 *in* Sy Tapsoba, 1990).



Expression qui résume sous forme simplifiée les équations fondamentales du système.

Le pH d'équilibre est obtenu par la formule simplifiée de Bakalowicz (1980) (*in* Sy Tapsoba, 1991) :

$$\text{pH}_{\text{éq}} = \text{pK}_2 - \text{pK}_{\text{Ca}} - \text{Log} [\text{HCO}_3^-] - [\text{Ca}^{2+}]$$

La différence ΔpH (pH mesuré - pH_{éq}) permet d'apprécier l'implication de la qualité chimique de l'eau dans la destruction prématurée des crépines et des pompes.

Si $\Delta\text{pH} < 0$, l'eau est acide ; le fer est attaqué et solubilisé par ionisation : il y a consommation d'ions H^+ et le pH augmente ; une crépine en fer dans une eau agressive risque donc d'être corrodée et ne sera plus en mesure de retenir les grains de sables.

Si $\Delta\text{pH} > 0$, il y a précipitation des carbonates qui vont colmater la crépine : l'eau est calcifiante ou incrustante.

On peut également déterminer graphiquement le pH d'équilibre et le CO_2 libre en reportant les résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Schoeller et Berkloff (Fig. 26 et 27).

Le pH d'équilibre est l'intersection entre la droite joignant les deux points représentant la concentration en Ca et en carbonates et bicarbonates (Tableau 6).

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE DE SCHOELLER

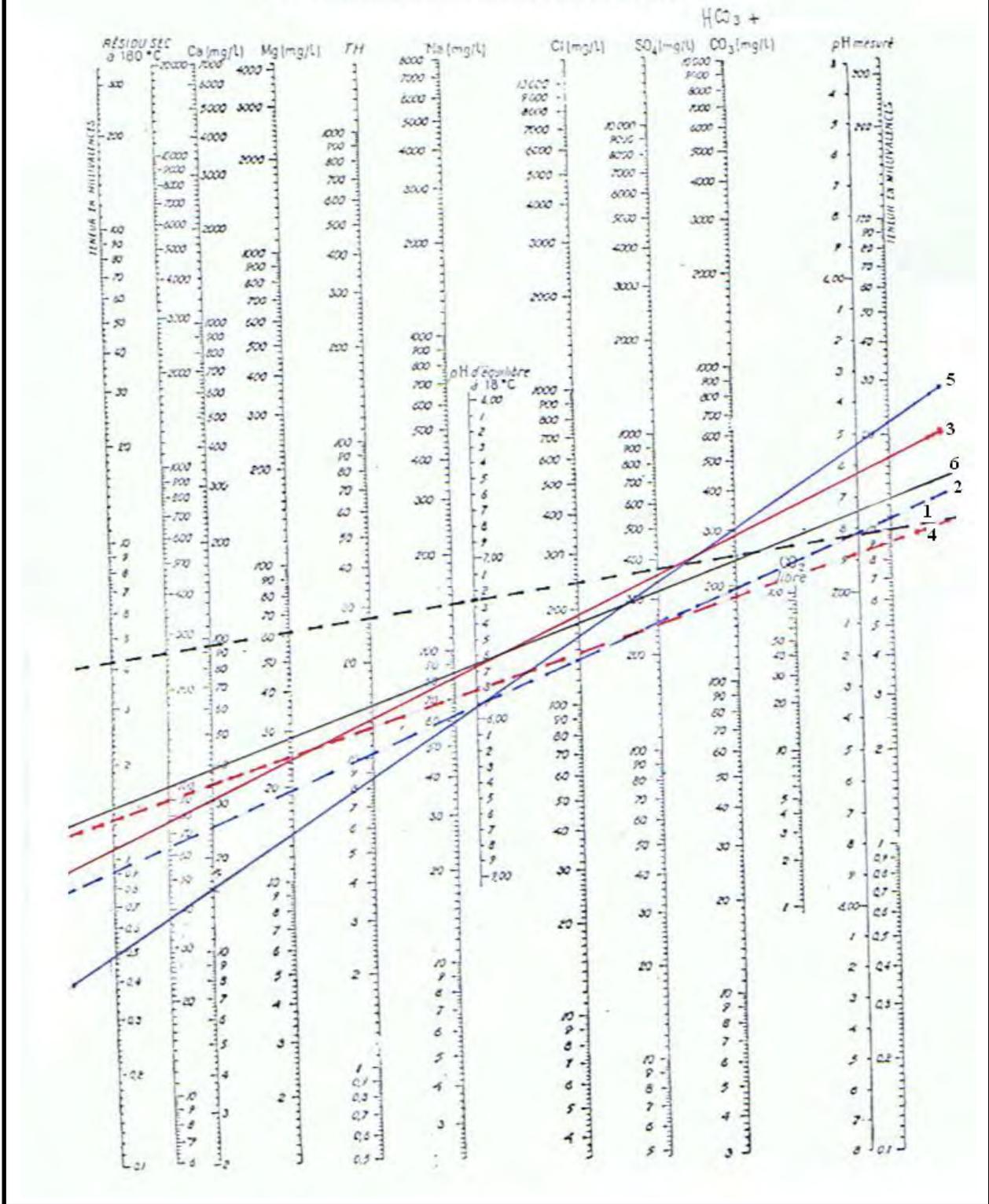


Figure 26 : Détermination des pH d'équilibre des eaux souterraines dans la zone du Gorgol-Guidimakha (Données 2006)

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE DE SCHOELLER

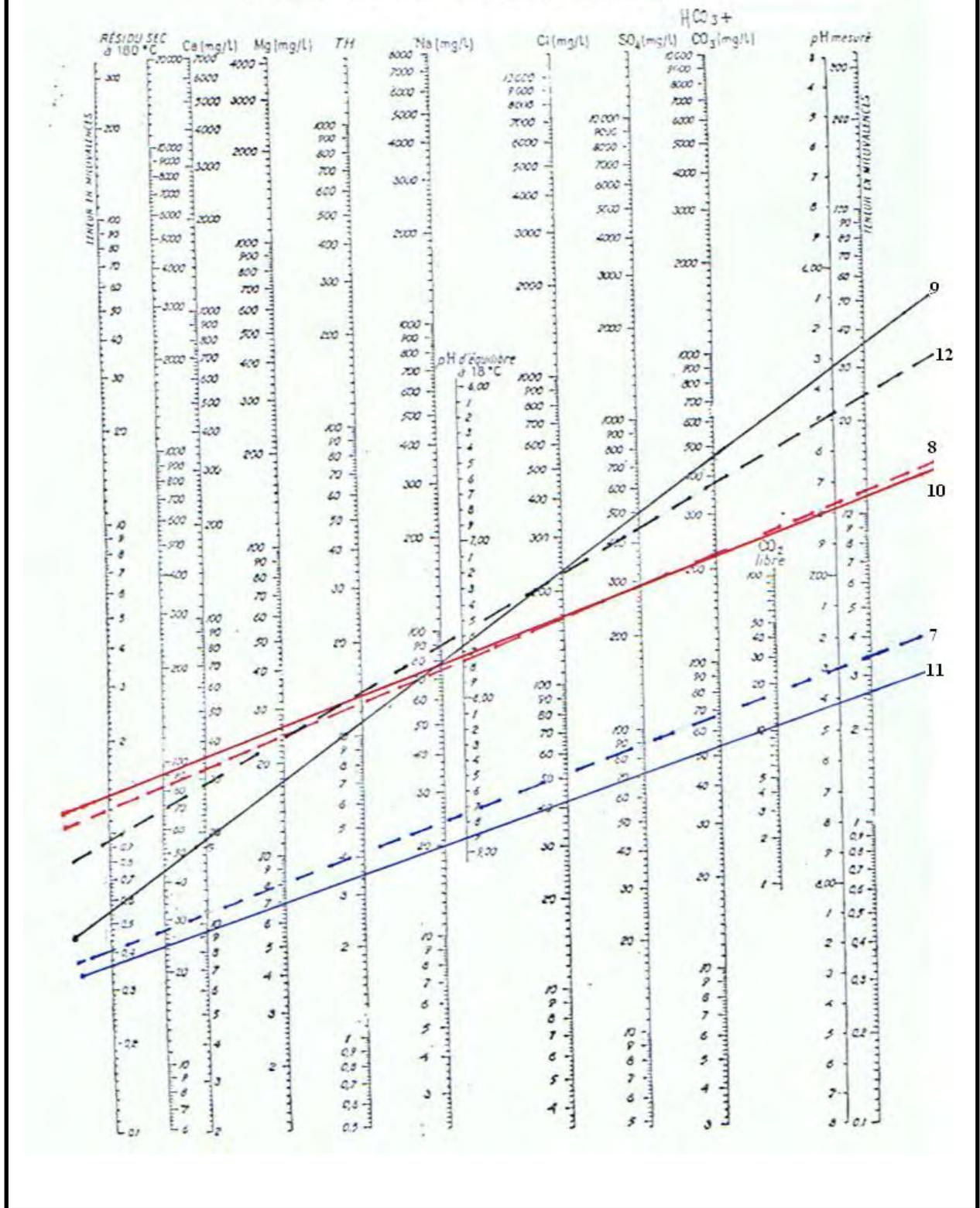


Figure 27 : Détermination des pH d'équilibre des eaux souterraines dans la zone du Gorgol-Guidimakha (Données 2006)

Tableau 6 : Valeurs des paramètres physiques et des indices de saturation des eaux souterraines dans la zone du Gorgol - Guidimakha

N°	Echantillons	C.E. ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	TDS (mg.l^{-1})	pH mesurés	pH d'équilibre	ΔpH	Aragonite	Calcite	Dolomite	Magnésite
1	Ajar Soninké F1	1156	876,88	7,37	7,8	-0,43	-0,389	-0,242	-1,003	-1,12
2	Ajar Soninké F2	375	268,47	7,23	7,9	-0,67	-0,942	-0,799	-1,442	-1,018
3	Wouloumboni Soninké F1	600	429,55	7,81	7,68	0,13	-0,872	-0,729	-0,824	-0,47
4	Wouloumboni Soninké F2	886	672,07	8,29	7,25	1,04	-0,54	0,089	0,941	0,478
5	Wouloumboni Maur	456	326,46	7,52	7,9	-0,38	-	-	-	-8,95
6	Ghabou	672	481,10	7,07	7,66	-0,59	-0,858	-0,716	-0,974	-0,633
7	Diowol	98	92,87	6,93	8,75	-1,82	-	-	-	-
8	Mbedya Asagha	388	277,78	7,43	7,76	-0,33	-	-	-	-
9	Ndjiadjibine	736	526,92	7,63	7,68	-0,05	-	-	-	-0,404
10	Diaguily	315	242,42	7,27	7,74	-0,47	-0,942	-0,787	-1,442	-1,018
11	Toufoundé Civé	70	66,34	6,86	8,9	-2,04	-	-	-	-
12	Agoynit	627	448,88	7,42	7,68	-0,26	-0,708	-0,566	-0,496	-1,018

La majorité des points d'eau échantillonnés dans la zone du Gorgol - Guidimakha, ont des pH d'équilibre supérieurs aux pH mesurés ($\Delta\text{pH} < 0$). Ces eaux sont donc agressives et peuvent attaquer les équipements métalliques des forages. C'est pourquoi les aciers inox ont été choisis pour équiper les nouveaux forages.

Les eaux des forages de Wouloumboni Soninké F1 et F2 qui ont des pH d'équilibre inférieurs aux pH mesurés ($\Delta\text{pH} > 0$) sont dites calcifiantes ou incrustantes. Ces eaux peuvent entraîner des phénomènes de précipitation des carbonates qui peuvent colmater les crépines des ouvrages de captage.

3.2.3. Calcul des indices de saturation des phases minérales

L'équilibre eau – minéral est souvent exprimé par l'indice de saturation (IS) déterminé par la formule :

$$\text{IS} = \text{Log} (\text{PAI}/\text{K}_s) \text{ avec,}$$

PAI : Produit d'activité ionique des ions concernés,

K_s : Constante d'équilibre.

Quand $\text{IS} = 0$, l'eau est alors en équilibre avec le minéral. En revanche, l'eau est sous-saturée ou sursaturée vis-à-vis du minéral dans le cas où IS serait inférieur ou supérieur à zéro. Toutefois, dans la pratique, il faut tenir compte des erreurs de précision dans la mesure de teneurs en éléments majeurs. Par conséquent, il est recommandé de considérer que le domaine de saturation est obtenu pour des valeurs comprises entre -1 et +1 (Plummer et *al.*, 1976).

Les indices de saturation (IS) des eaux vis-à-vis des phases minérales (aragonite, calcite, dolomite et magnésite) présentes dans les matrices des aquifères captés par les forages de la zone du Gorgol - Guidimakha, ont été calculés à partir du programme Wateq (Tableau 6) (Truesdel et Jones, 1974 ; Plummer et *al.*, 1976). Ils sont utilisés pour évaluer le degré d'équilibre entre l'eau et le minéral afin de mettre en évidence les différents stades de l'évolution géochimique des eaux qui se traduisent par une variation de ces indices.

Les résultats des calculs d'indices de saturation (IS) des eaux souterraines vis-à-vis de certains minéraux carbonatés sont reportés sur le tableau 6. Ces résultats montrent que les eaux de l'ensemble des forages échantillonnés dans la zone du Gorgol - Guidimakha, ont des indices de saturation négatifs et sont sous-saturées vis-à-vis de l'aragonite, de la calcite, de la dolomite et de la magnésite. Ainsi, il peut y avoir des réactions de dissolution des minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite), dans ce cas l'eau est dite agressive. Seul l'eau du forage situé dans la localité

de Wouloumboni Soninké F2 a des indices de saturation positifs et est donc saturée vis-à-vis de la calcite, de la dolomite et de la magnésite.

3.3. Qualité des eaux souterraines

3.3.1. Potabilité des eaux souterraines

Pour l'étude de la qualité des eaux des nappes de la zone d'étude, nous nous limiterons à l'étude comparative de certains éléments chimiques aux normes de qualités requises pour une eau de boisson car les analyses bactériologiques n'ont pas été réalisées.

Les normes de potabilité de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S., 1993) relatives à la qualité chimique des eaux et les résultats chimiques (minimum et maximum) des nappes de la zone d'étude sont représentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Normes de potabilité de l'O.M.S. (1993) et paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans la zone du Gorgol - Guidimakha

Paramètres et substances chimiques	Concentrations maximales admissibles (O.M.S.)	Teneurs chimiques dans les eaux souterraines (Données 2006)	
		Minimum	Maximum
T (°C)	25	27,10	27,50
pH	9,60	06,86	08,29
CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	2000	70,00	1156,00
Cl (mg.l^{-1})	200	06,00	122,00
SO ₄ ²⁻ (mg.l^{-1})	250	00,00	71,61
NO ₃ ⁻ (mg.l^{-1})	50	00,00	198,50
Na ⁺ (mg.l^{-1})	100	04,00	65,00
K ⁺ (mg.l^{-1})	12	01,00	02,00
Mg ²⁺ (mg.l^{-1})	50	02,92	50,54
Ca ²⁺ (mg.l^{-1})	100	09,62	94,58

Ces résultats montrent que les eaux dans la zone d'étude, sont de qualité acceptable pour l'ensemble des éléments majeurs. Concernant les nitrates, ils sont présents dans la plupart des points d'eau analysés, mais à des concentrations inférieures à la valeur maximale admissible pour l'eau de boisson de 50 mg.l^{-1} l'O.M.S. Sauf aux forages hydrauliques d'Ajar Soninké (F2) et de Diaguily situés dans la région de Guidimakha, où les concentrations en nitrates sont respectivement de