

3.2 Collecte, classification et analyse des documents existants

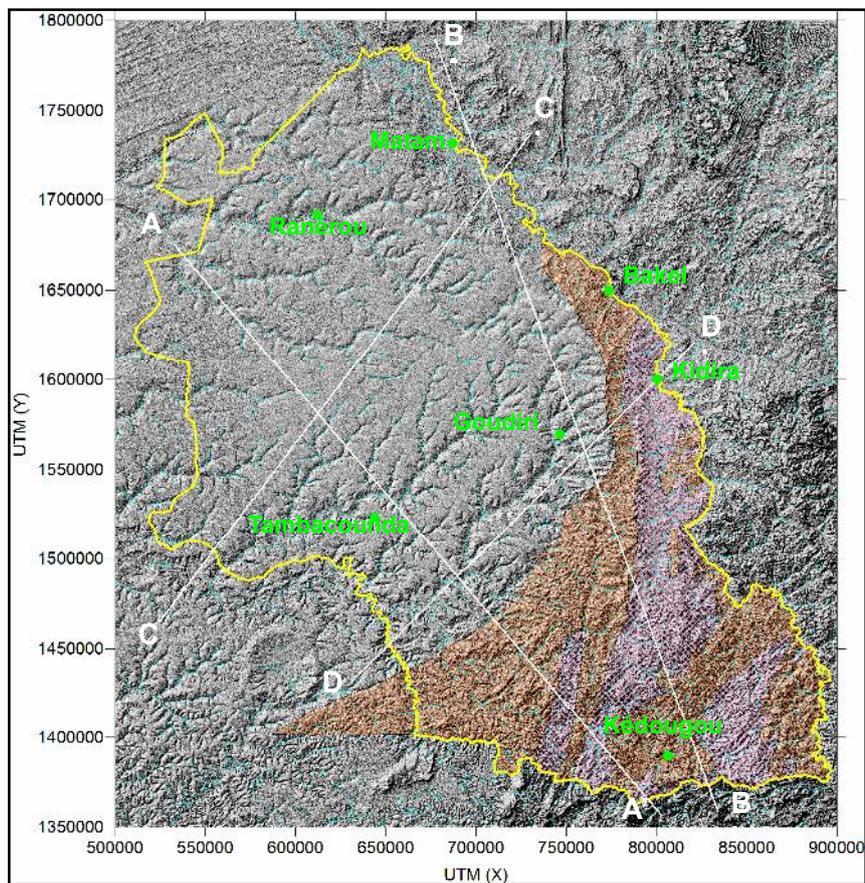
3.2.1 Documents existant collectés

Les rubriques des principaux rapports et données, etc. qui ont été collectés, classifiés et analysés dans le cadre du présent projet sont indiquées ci-après. Les titres exacts des documents figurent dans le Rapport de soutien (au paragraphe 5.1).

- Topographie, mesures (y compris données d'altitude)
- Cartes topographiques, cartes des structures géologiques, cartes hydrogéologiques, cartes géologiques et minières
- Rapports en relation avec la géologie, l'hydrogéologie et les eaux souterraines (y compris foration de puits, modélisation et qualité de l'eau)
- Prospection géophysique
- SIG/ Base de données
- Météorologie (précipitations journalières, températures mensuelles)
- Débits des cours d'eau

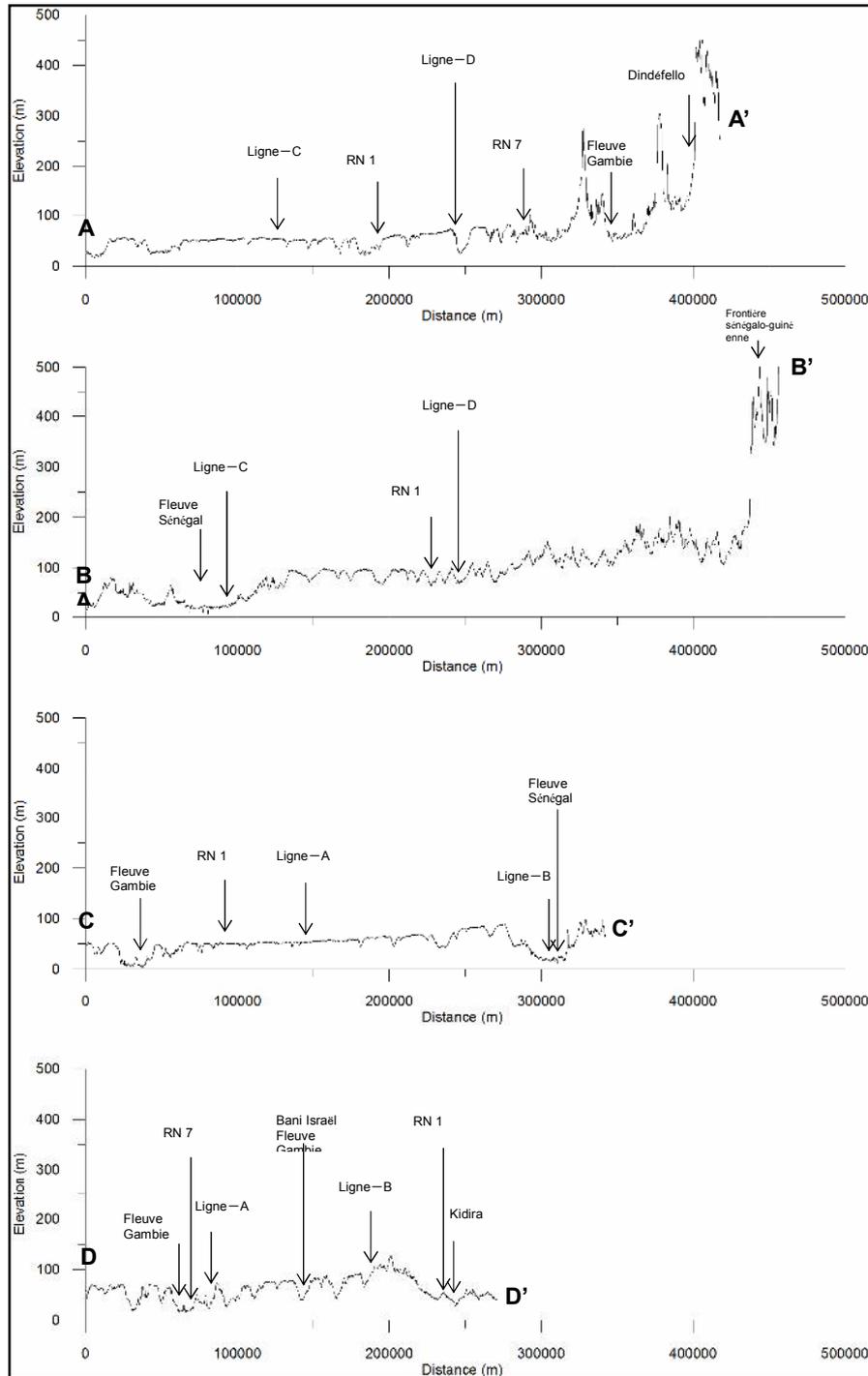
3.2.2 Analyse topographique

Une carte des caractéristiques géographiques fines (Figure 3-2-1, Rose: zone de granites, rouge: zone de roches sédimentaires et métamorphiques du Cambrien) et une coupe topographique (Figure 3-2-2) de la zone d'étude sont établies sur la base des données d'élévation numériques de SRTM-90 pour saisir les particularités topographiques de la zone concernée et de ses environs.



(Source : SRTM-90)

Figure 3-2-1 Carte des caractéristiques géographiques fines



(La position de la ligne de coupe est indiquée sur la Fig. 3-2-1)
Figure 3-2-2 Coupe topographique

Ces cartes révèlent les particularités topographiques de la zone concernée, avec notamment:

- L'existence d'une falaise raide aux environs de la frontière guinéenne
- L'existence de collines où sont distribuées des roches basaltiques
- L'existence de pentes douces en direction sud-est - nord-ouest
- Les emplacements bas sur les pentes ci-dessus ont tendance à avoir une pente raide du côté nord-ouest et une pente douce du côté sud-est.
- Le relèvement de la rive ouest du fleuve Sénégal et pente douce vers le sud-ouest

3.2.3 Analyse géologique et hydrogéologique

(1) Généralités géologiques et hydrogéologiques

Le rapport d'étude élaboré en 2001 par la DGPRE (Consultant exécutant : COWI) présente l'étude qui sert actuellement de référence pour comprendre les ressources en eaux souterraines au Sénégal et il inclut les éléments suivants :

- Résumé de la situation hydrogéologique de l'ensemble du Sénégal centrée sur une couche du Maastrichtien et stratigraphie hydrogéologique principalement sur les couches du Maastrichtien.
- Identification de l'emplacement des puits et observation du niveau des eaux souterraines par GPS
- Modélisation et analyse du potentiel des eaux souterraines sur la base des résultats ci-dessus.

La stratigraphie hydrogéologique établie par l'étude ci-dessus est présentée dans le Tableau 3.2.1. Par ailleurs la Figure 3.2.3 montre une carte géologique élaborée dans le cadre du présent Projet. Il est possible de diviser les aquifères en 5 différentes couches ; en partant du bas, notamment avec (1) l'aquifère du Maastrichtien, (2) l'aquifère du Paléocène, (3) l'aquifère de l'Eocène, (4) l'aquifère du continental terminal/ Oligo-Miocène et (5) l'aquifère du Quaternaire. Une présentation générale de ces aquifères et des différentes roches du socle est donnée ci-après.

1) Roches du socle

Les principales roches réparties dans la zone de roches du socle, de la partie sud de la zone du projet sont les basaltes (basalte, dolérites, spilites, etc.) les roches carbonatées (calcaires, marnes indurées, etc.) les granites (granites, aplites, etc.), les schistes (schistes verts, micaschistes, amphibolites, etc.) les quartzites et les roches sableuses (grès, schistes silicieux, grauwacke). Par ailleurs, parmi les filons intrusifs, des veines de pegmatites et de quartz se trouvent dans les roches indiquées ci-dessus.

En ce qui concerne les forages existants dans la zone des roches du socle, ils sont souvent équipés de crépines dans les parties de broyage tectonique dans (1) les zones de répartition de basaltes, (2) aux environs des failles, (3) dans les zones des groupes de filons et (4) aux frontières entre les couches, etc.

2) Couche du Maastrichtien

La couche du Maastrichtien, dont la partie supérieure est constituée du Crétacé, est largement répartie dans la zone du projet et sa base de support s'approfondit vers l'ouest. Cette couche est composée de sédiments marins tels que les grès, les couches de sable et les couches de sable boueux, et l'on peut supposer qu'une couche d'argile noire se trouve dans sa partie la plus basse. En outre, de nombreuses couches d'argile noire se retrouvent également en bordure avec la couche du Paléocène de la partie supérieure.

La particularité générale est que cette couche constitue le principal aquifère de la région de Matam et étant donné qu'elle se situe à une grande profondeur dans la région de Tambacounda, l'exploitation des eaux souterraines est effectuée jusqu'à cette couche dans les zones et aux points où la prise d'eau à partir de la couche Co, située au niveau supérieur est insuffisante.

3) Aquifère du Paléocène

La couche du Paléocène est constituée de sédiments de transgression marine ultérieure au Crétacé, principalement composés de roches carbonatées. Des zones de marnes sont également largement disséminées, et la perméabilité de ces couches marneuses est faible.

Les conditions pour les aquifères ne pouvant pas être considérées comme excellentes, seul un petit nombre de forages sont équipés de crépines dans cette couche, dans la région du projet.

3.2.5 Qualité de l'eau

(1) Principaux ions

Le diagramme trilinéaire présentant les principaux ions constituant un système de composants a été élaboré en utilisant les résultats des analyses de la qualité de l'eau archivés par la DGPRE (Figure 3-2-15).

Les facteurs suivants peuvent être énoncés comme étant les caractéristiques de la qualité de l'eau des eaux souterraines dans la zone du projet.

- Couche Co : Les éléments relatifs à la qualité de l'eau, notamment les carbonates des sols alcalins sont nombreux. Il s'agit de types se trouvant en grande quantité dans les eaux des cours d'eau et dans les eaux souterraines en nappes peu profondes.
- Couche Ma : Les éléments classifiés non carbonates et carbonates des sols alcalins sont présents en grand nombre. Les premiers se trouvent souvent dans les eaux thermales alors que les seconds se trouvent en grande quantité dans les eaux des cours d'eau et dans les eaux souterraines en nappes peu profondes, comme indiqué ci-dessus.
- Roches du socle : Les éléments carbonates des sols alcalins et carbonates alcalins sont présent en grand nombre. Les premiers se trouvent souvent dans les eaux des cours d'eau et dans les eaux souterraines en nappes peu profondes, comme indiqué ci-dessus, alors que les seconds sont nombreux dans les eaux souterraines en nappes profondes.

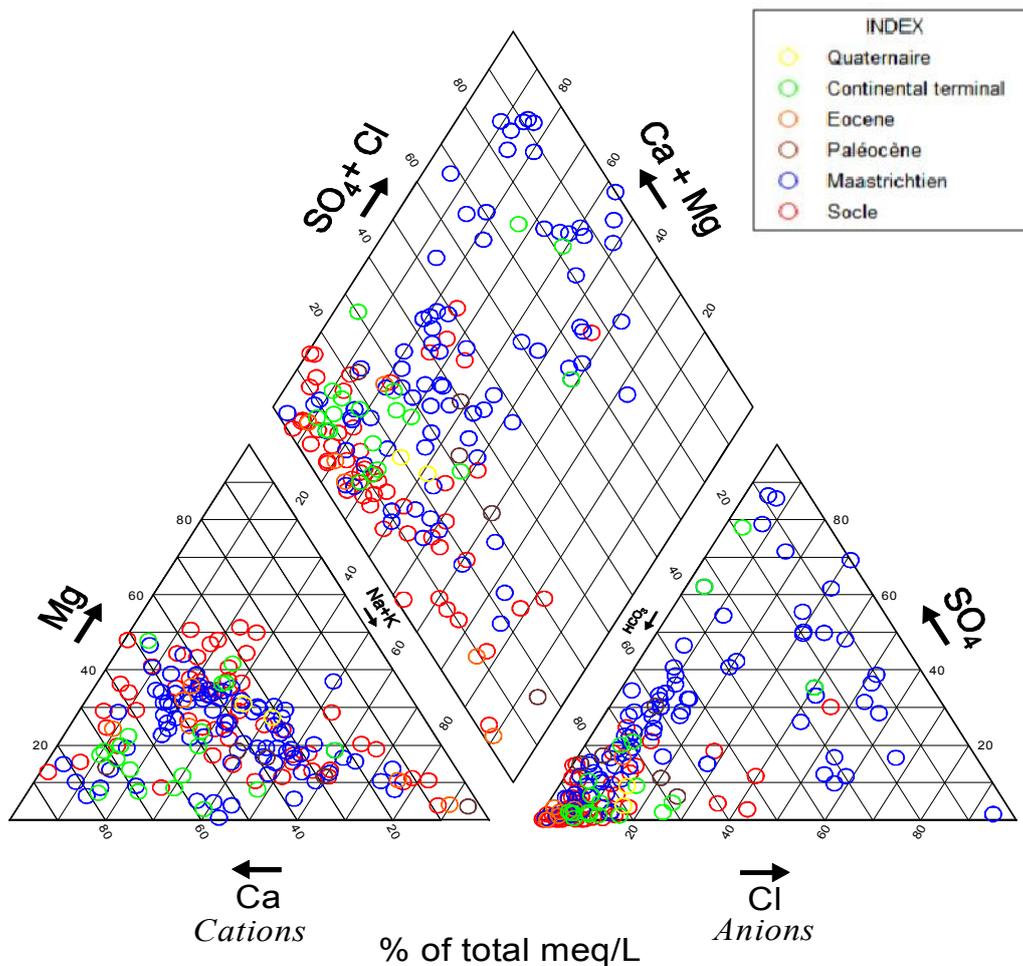


Figure 3-2-15 Diagramme trilinéaire des eaux souterraines

2) Précipitations probables

Lors du calcul de prévision par simulation évoqué dans le paragraphe 3.4, le calcul des précipitations probables a été effectué pour obtenir un document de base destiné à l'élaboration d'un scénario tenant compte des années de sécheresse et des années de fortes précipitations et déterminer les caractéristiques régionales.

Les détails concernant la méthode de calcul sont indiqués dans le Rapport de soutien (paragraphe 5.6) mais la méthode Iwai, la méthode Ishihara-Takase, la méthode Gumbel, la méthode Thomas et la méthode Hazen ont été appliquées pour le calcul stochastique des précipitations en utilisant les données des précipitations annuelles relevées dans les stations de mesure indiquées dans le tableau 3-2-5. Les résultats des calculs pour chaque station de mesure sont indiqués dans le Rapport de soutien (paragraphe 5.6) mais la répartition des précipitations annuelles avec des probabilités de 10 ans, 30 ans, 50 ans et 100 ans pour des années de sécheresse et les années de fortes précipitations en appliquant la méthode Thomas est indiquée dans la Figure 3-2-18.

Avec les probabilités des années de fortes précipitations, les précipitations ci-dessous peuvent être estimées.

- Avec une probabilité de 10 ans, de 600 à 750 mm/an dans la région de Matam, et de 750 à 1 500 mm/an dans les régions de Tambacounda et Kédougou
- Avec une probabilité de 30 ans, de 750 à 850 mm/an dans la région de Matam, et de 850 à 1 700 mm/an dans les régions de Tambacounda et Kédougou
- Avec une probabilité de 50 ans, de 800 à 950 mm/an dans la région de Matam, et de 950 à 1 800 mm/an dans les régions de Tambacounda et Kédougou
- Avec une probabilité de 100 ans, de 850 à 950 mm/an dans la région de Matam, et de 950 à 1 900 mm/an dans les régions de Tambacounda et Kédougou.
- D'autre part, avec les probabilités des années de sécheresse, les précipitations ci-dessous peuvent être estimées.
- Avec une probabilité de 10 ans, de 250 à 400 mm/an dans la région de Matam, et de 400 à 950 mm/an dans les régions de Tambacounda et Kédougou
- Avec une probabilité de 30 ans, de 200 à 350 mm/an dans la région de Matam, et de 350 à 850 mm/an dans les régions de Tambacounda et Kédougou
- Avec une probabilité de 50 ans, de 200 à 300 mm/an dans la région de Matam, et de 300 à 800 mm/an dans les régions de Tambacounda et Kédougou
- Avec une probabilité de 100 ans, de 200 à 300 mm/an dans la région de Matam, et de 300 à 800 mm/an dans les régions de Tambacounda et Kédougou.

Tableau 3-2-5 Données des stations de mesure climatiques où les calculs stochastiques des précipitations ont été effectués

Point de mesure	Pays	Longitude	Latitude	UTM-X	UTM-Y	Elévation (m)
Linguere	Sénégal	15,383	-15,177	487 444	1 700 692	21
Dahra	Sénégal	15,200	-15,300	467 778	1 680 469	39
Matam	Sénégal	15,650	-13,250	687 583	1 730 994	17
Bakel	Sénégal	14,900	-12,400	779 733	1 648 898	25
Kaffrine	Sénégal	14,200	-15,200	478 421	1 569 855	11
Tambacounda	Sénégal	13,767	-13,683	642 377	1 522 347	50
Dialakoto	Sénégal	13,317	-13,300	684 138	1 472 821	50
Kidira	Sénégal	14,300	-12,100	812 881	1 582 862	35
Koungheul	Sénégal	13,600	-14,5	554 088	1 503 545	11
Vwlingara Casamance	Sénégal	13,000	-13,500	662 679	1 437 615	38
Kédougou	Sénégal	12,567	-12,217	802 415	1 390 852	167
Goudiri	Sénégal	14,183	-12,716	746 512	1 569 203	59
Ranérou	Sénégal	15,300	-13,966	611 011	1 691 772	33
Semme	Sénégal	15,200	-12,950	720 225	1 681 480	40

3.3 Résultats de l'étude sur site

3.3.1 Etude géologique et hydrogéologique

(1) Objectifs et méthodologie de l'étude

Le présent paragraphe a pour objectif de confirmer la topographie et les conditions géologiques dans la région concernée par l'étude et d'identifier leurs caractéristiques. Les affleurements de la couche sédimentaire étant extrêmement limités, les prospections topographiques et géologiques ont principalement porté sur la zone des roches du socle. La procédure de la présente étude est telle qu'indiquée ci-dessous.

Avant l'étude sur site

- ①. Identification des caractéristiques topographiques (Voir paragraphe précédent)
- ②. Identification de l'emplacement des ouvrages hydrauliques existants
- ③. Sélection des zones concernées par l'étude sur site sur la base des cartes géologiques existantes (1/20 000ème)

Etude sur site

- ①. Observation des points présentant des caractéristiques topographiques
- ②. Observation de la géologie représentative des roches affleurantes
- ③. Visite des ouvrages hydrauliques existant dans des points présentant des caractéristiques topographiques et géologiques, et observation de la géologie de leurs environs

(2) Résultats de l'étude

Les détails des résultats de l'étude sont indiqués dans le Rapport de soutien (paragraphe 5.2) et seules les grandes lignes sont présentées ici. La prospection sur site a été effectuée au niveau des installations existantes ayant les caractéristiques topographiques et géologiques suivantes.

- Partie inférieure des falaises proches de la frontière avec la Guinée
- Partie inférieure des collines avec roches basaltiques disséminées
- Zone avec schistes disséminés
- Zone avec schistes disséminés (aux environs de la faille avec quartzites)
- Zone avec quartzites disséminés (aux environs de la faille avec schistes)
- Aux environs de la faille dans les granites
- Zone des veines de quartz
- Zone de grès du Cambrien

Les grandes lignes des résultats de l'étude sont résumées dans le Tableau 3-3-1. Par ailleurs, des exemples de cartes topographiques et de cartes géologiques réalisées au moment de l'étude de chacun des points sont présentés dans la Figure 3-3-1. Ces résultats ont été utilisés, en particulier, en tant que documents de base pour l'étude du potentiel des eaux souterraines dans chaque type de roches dans la zone des roches du socle.

Tableau 3-3-1 Ouvrages existants dans la zone des roches du socle et hydrogéologie

Villages	Relief	Carte géologique 1/200.000	Structure géologique	nappe phréatique	Caractéristiques des principaux points d'eau					
					Profondeur de foration Profondeur du forage	Position de la crépine	Niveau d'eau statique	Volume d'exhaure	Rabatement	Qualité de l'eau
Segou	Bas de la falaise raide à la frontière guinéenne	Granites	—	Schistes (birrimiens), aggloméré (birrimien) Faille, couche fracturée	40,5m 40,5m	29,1~ 40,5m	16,1m	10m ³ /h	6,6m	
Dindéfello	Bas de la falaise raide à la frontière guinéenne	Granites	—	Granites Faille, couche fracture	58,4m 56,9m	32,3~ 56,9m	6,8m	10m ³ /h	35,6m	
Ibel	Pied des collines basaltiques	Roches granitiques etc.	—	Schistes Faille, couche fracture	37,6m 35,8m	11,2~ 35,8m	7,1m	30m ³ /h	9,6m	
Salemata	Entouré de petites	Schistes	—	Roches cristallines,	88,15m	28,15~	6,15m	9m ³ /h	19,8m	

Villages	Relief	Carte géologique 1/200.000	Structure géologique	nappe phréatique	Caractéristiques des principaux points d'eau					
					Profondeur de foration Profondeur du forage	Position de la crépine	Niveau d'eau statique	Volume d'exhaure	Rabattement	Qualité de l'eau
	collines			digue de quartz	70,15m	64,15m				
Ebarak	—	Limite entre schistes, quartzite et grès	Faïlle aux environs	Quartzite (paléozoïque), Faïlle, couche fracturée	49,0m 48,7m	14,6~ 48,7m	6,6m	4,3m ³ /h	6,1m	Fer (5,0mg/l)
Banfarato	—	Limite entre quartzite et schistes	Faïlle aux environs	Marnes Faïlle, couche fracture	45,0m 45,0m	27,9~ 45,0m	5,0m	1,4m ³ /h	12,6m	
Bandioula	—	Granites	Faïlle	Gabbro	45,1m 40,25m	—	7,28m	19,5m ³ /h	1m	
Kondokhou	—	Granites	Faïlle	Granites Faïlle, couche fracture	45,0m 45,0m	16,4~ 45,0m	11,1m	5,4m ³ /h	19,5m	Fer (5,0mg/l 以上)
Daloto	—	Schistes, quartzite, graywacke, aggloméré etc.	Digue de quartz	Schistes (Birimien) Faïlle, couche fracturée	45,1m 45,0m	37,8~ 45,0m	22,6m	12m ³ /h	10,6m	Fer (3,5mg/l)
Bellé	Entre de petites collines	Grès quartziques	Faïlle aux environs	Quartzite (Cambrian) Faïlle, couche fracturée	58,6m 58,6m	30,0~ 58,6m	23,1m	3,5m ³ /h	—	

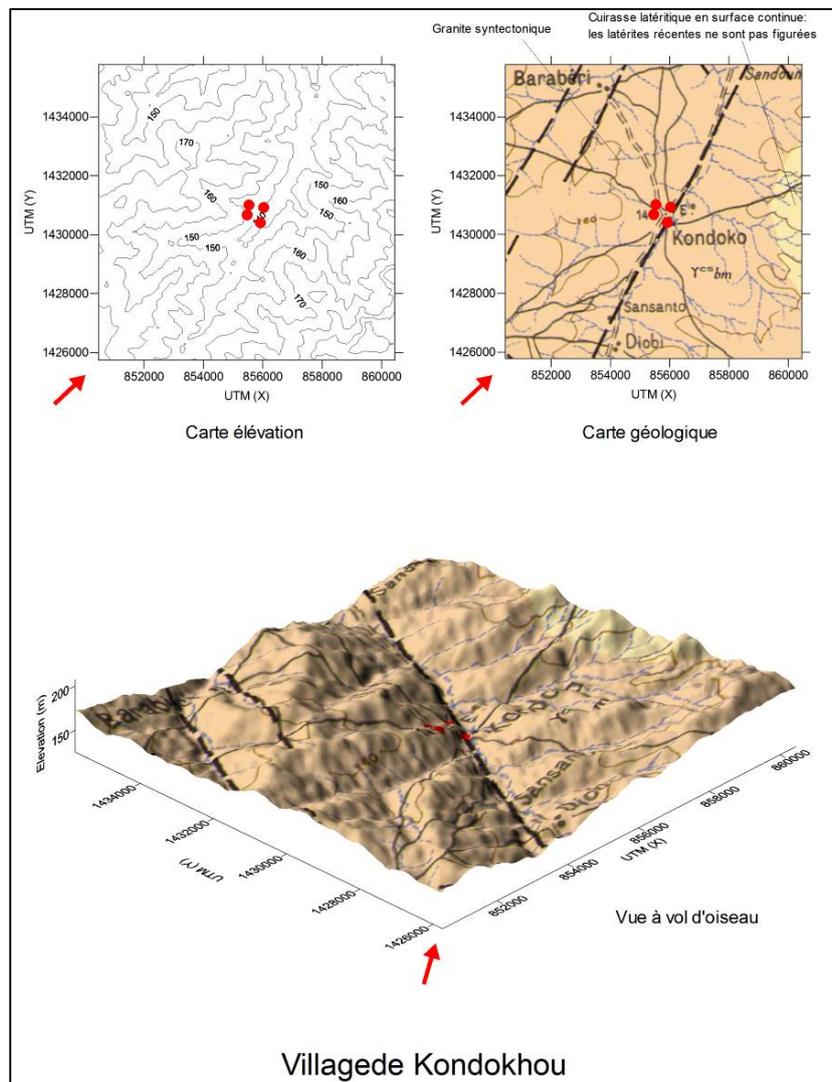


Figure 3-3-1 Topographie, géologie et emplacement des ressources en eau aux alentours du village de Kondokhou

3.3.2 Forages d'essai

(1) Objectifs de l'étude et sélection des points de forage

Dans cette étude on vise principalement la confirmation du potentiel des ressources en eau. Mais les points de forage ont été choisis en considérant les objectifs secondaires.

1) Modifications de la géologie dans les roches du socle.

Une étude a été effectuée afin de confirmer les modifications de la géologie des roches du socle et la fréquence des fissures. Généralement, l'efficacité de forage baisse dans la zone du socle. Pour cela, la foration est conventionnellement arrêtée à environ 80 m. Dans cette étude, la foration s'est poursuivie jusqu'à 150 m conformément aux objectifs secondaires.

2) Confirmation de la couche alluvionnaire au-dessus des roches du socle

Dans plusieurs villages, situés le long du fleuve, les eaux des flux souterrains de la couche d'alluvions sont utilisées. Toutefois, il n'existe pas de documents relatifs à la répartition des eaux des flux souterrains sur le plan topographiques et géologiques, telles que la distance par rapport au fleuve, l'épaisseur de la couche d'alluvions ou le degré d'altération des roches du socle. Etant donné la présence de plusieurs villages situés dans des structures géologiques identiques le long du fleuve Sénégal, une étude a été effectuée dans le but de collecter des documents de base en supposant l'utilisation des eaux des flux souterrains à l'avenir.

3) Vérification de la structure géologique

La vérification de la structure peut être achevée avec les données existantes et les données vérifiées lors de la prospection géophysique, mais comme les données existantes ont révélé une structure complexe à la limite de la zone, des emplacements intermédiaires à structure modifiée et des emplacements où les forages sont éloignés les uns des autres ont été sélectionnés pour une modélisation précise de la structure.

Tableau 3-3-2 Emplacements de l'étude des forages d'essai et raisons de leur sélection

Nombre	CR	Village	Latitude	Longitude	Sélection pour une autre raison que l'identification du potentiel des ressources en eau
TM1	Goudiry	AinouMahdi	14,2611	-12,5422	Confirmation des structures géologiques
TM2	Commune	Diawara1	15,0149	-12,5360	Confirmation de la couche alluvionnaire au-dessus des roches du socle
TM3	Moudery	Gande	15,1016	-12,6602	Confirmation de la couche alluvionnaire au-dessus des roches du socle
TM4	Commune	Diawara2	15,0212	-12,5337	Confirmation de la couche alluvionnaire au-dessus des roches du socle
TM5	Bokiladji	GangelMaka	14,9498	-12,7356	Modification de la géologie dans les roches du socle
TM6	Sinthou Fissa	YariMale	14,2575	-12,4579	Modification de la géologie dans les roches du socle
TM7	Shinthou Fissa	Takoutara	14,1534	-12,2395	Modification de la géologie dans les roches du socle
TM8	Khossanto	Khossanto	13,1343	-11,9646	Modification de la géologie dans les roches du socle
TM9	Missirah	Medina Diakha	13,3884	-13,4763	Confirmation des structures géologiques
TM10	Bani Israel	Diana	13,5454	-12,8628	Confirmation des structures géologiques
TM11	Aoure	Tiendiel Demba Djibi	14,7082	-12,7099	Confirmation des structures géologiques
TM12	Dougue	Soutouta	13,8053	-12,7172	Confirmation des structures géologiques
TM13	Goudiry	Dinde Daka	14,2749	-12,6068	Confirmation des structures géologiques

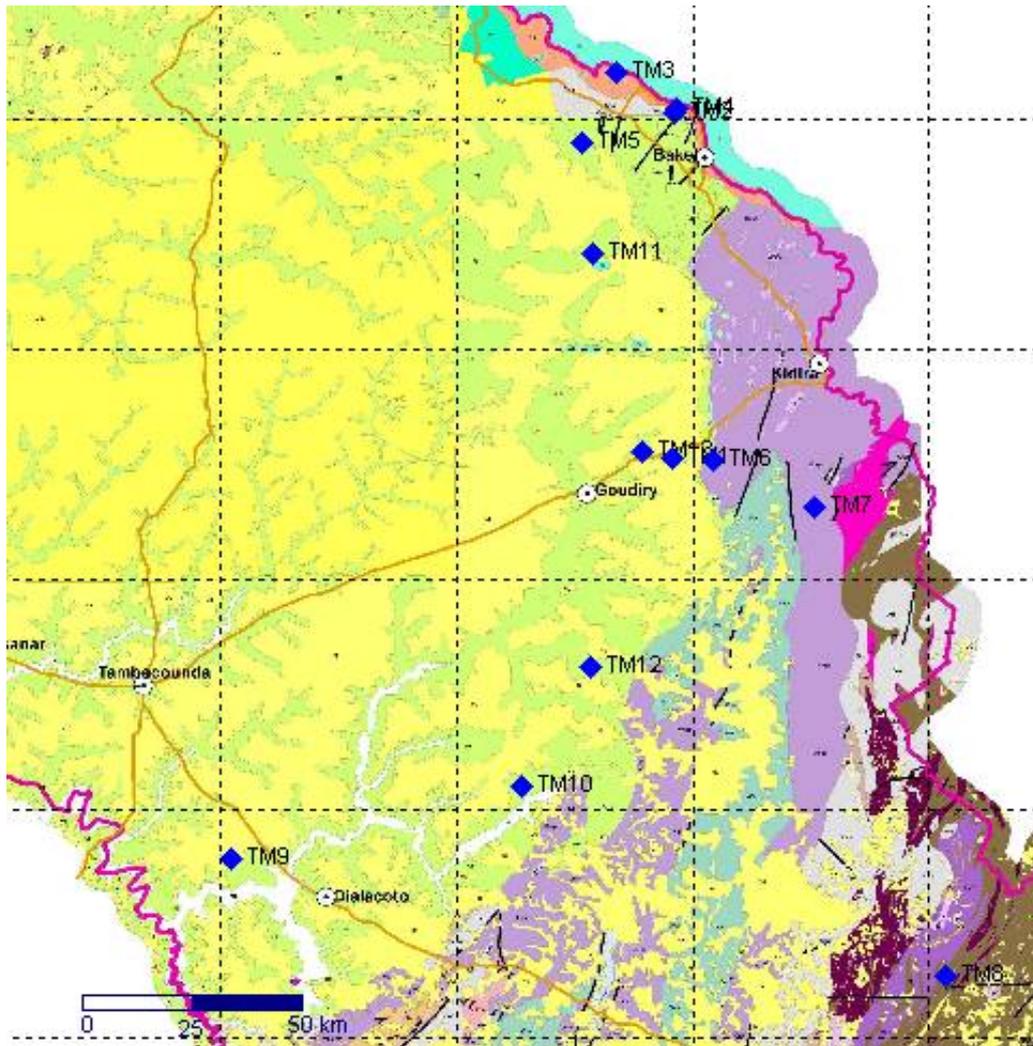


Figure 3-3-2 Points de forage à l'essai

4) Aperçu hydrogéologique de la zone sélectionnée

Dans la plupart des régions du Sénégal, à commencer par la partie ouest de la région concernée, la zone de roches sédimentaires dans la région limitrophe peut être distinguée clairement à partir des fragments de foration, pour la couche de sable et d'argile de la couche Co, les calcaires et les marnes indurées de la couche Pa (Eo) et la couche de sable et d'argile de la couche Ma. Par ailleurs, dans la région limitrophe, chacune des couches diminue en épaisseur et cette région se caractérise par le fait qu'il n'y a pas de différence nette entre les couches composées de sable et d'argile. Dans la région sélectionnée de la zone de roches du socle, des horsts ayant des différences d'altitude de plus de 30 m s'étendent en ligne droite, et les vallées entre ces horsts ont un relief plat comme si elles avaient été remblayées (aucun remblaiement n'ayant été effectué en réalité).

(2) Spécification des forages

Les spécifications des forages sont les suivantes. Le diamètre du tubage est déterminé selon le diamètre extérieur de la pompe installée. Dans la région des roches sédimentaires, des tubages de diamètre intérieur de plus 8 pouces sont utilisés pour un volume de pompage des installations standard de 30 à 50 m³/h, alors que dans la région des roches du socle, étant donné que 20 m³/h environ au maximum sont difficiles à dépasser pour le volume de pompage, des tubages de 6 pouces de diamètre intérieur sont utilisés. Le diamètre d'excavation est déterminé afin de conserver un espace de plus de 2 pouces pour le remplissage de graviers. Le diamètre des tubages télescopiques est également déterminé selon les mêmes raisons. Ces spécifications ont été adoptées en tenant compte du fait qu'à la fin de l'étude, les forages seront équipés et utilisés comme installation d'approvisionnement en eau.

Par ailleurs, la méthode de mise en place des tubages télescopiques n'est pas appliquée car il n'y a pas de différence de profondeur entre le niveau d'eau dynamique et l'aquifère, et pour qu'il n'y ait pas de limite de profondeur pour l'installation des pompes. La profondeur d'arrêt d'excavation a été déterminée après avoir confirmé l'apparition de fragments échantillons des roches du socle ainsi qu'une baisse considérable de la vitesse de forage après avoir percé la couche érodée.

Les essais de pompage ont inclus des essais graduels, en 4 étapes d'une heure chacune, et en essais continus de pompage pendant 12 heures. Les essais graduels ont été effectués dans le but de confirmer le degré de nettoyage et de rechercher chacun des coefficients de pertes, alors que les essais en continu ont eu pour objectif le calcul des constantes hydrauliques ainsi que le degré de stabilité des fluctuations du niveau d'eau.

Tableau 3-3-3 Spécification des forages

Cible	Méthode	Profondeur préconisée	Diamètre de forage	Diamètre Tubage
Fracture dans la roche Précambrienne	MTF	150m	8 pouces	6 pouces PVC
Roche sédimentaire	Rotary à boue	Vérification du socle (100-200m)	14 pouces	8 pouces PVC
		Vérification du socle 450m	Haut 14-3/4 pouces Bas 8-1/2 pouces	Haut 10 pouces PVC Bas 4 pouces SUS

(3) Résultats des forages d'essai

Les constantes hydrauliques obtenues par les résultats de l'étude des forages d'essai et les essais de pompage sont présentées respectivement dans les Tableaux 3-3-4 et 3-3-5.

Tableau 3-3-4 Résultats des forages d'essai

Nombre	CR	Village	Nappe phréatique	Profondeur (m)	Profondeur du socle (m)	Tubage (m)	Niveau d'eau statique (m)	Essai de pompage continu 12H		
								Volume d'exhaure (m ³ /h)	Niveau d'eau (m)	Rabattement (m)
TM1	Goudiry	AinouMahdi	Ma	72,0	64	70,8	49,3	44,0	53,4	4,1
TM2	Commune	Diawara1	Alluviale	25,0	12	22,3	2,9	3,4	14,9	13,0
TM3	Moudery	Gande	Alluviale	26,1	25	26,0	10,4	71,1	11,9	1,4
TM4	Commune	Diawara2	Alluviale	24,0	21,5	23,6	10,6	21,5	6,4	6,5
TM5	Bokiladji	GangelMaka	Socle	121,0	26	58,9	12,9	35,8	45,2	32,2
TM6	Sinthou Fissa	YariMale	Socle	151,0	18	86,6	46,7	1,5	82,6	36,0
TM7	Shinthou Fissa	Takoutara	Socle	98,0	5	82,1	9,84	13,3	3,4	3,6
TM8	Khossanto	Khossanto	Socle	150,0	9	92,2	8,1	8,1	71,0	62,8
TM9	Missirah	Medina Diakha	Ma	250,0	248	250,0	17,5	62,7	28,3	10,8
TM10	Bani Israel	Diana	Ma	91,0	60	81,6	18,4	15,5	44,7	26,3
TM11	Aoure	Tiendiel Demba Djibi	Ma	88,0	88	87,0	43,9	55,2	49,7	5,8
TM12	Dougue	Soutouta	Ma	61,0	61	60,2	13,7	66,0	10,8	10,8
TM13	Goudiry	Dinde Daka	Ma	84	84	81	34,5	62,8	36,1	1,6

Le coefficient de transmissivité a été recherché selon 4 différentes méthodes. Dans les résultats de chacune des analyses, il existe des différences de l'ordre de zéro. Cela provient des différences dans les méthodes d'analyse. Ces différences peuvent être justifiées, outre le fait qu'il existe des tolérances dans les méthodes de mesure des volumes de pompage, par le fait que les valeurs sont différentes selon la position d'appariement dans la méthode Thiès qui est une méthode d'appariement des courbes, le fait que les valeurs sont différentes selon l'intervalle de calcul considéré, car les relations entre la baisse de niveau d'eau et le temps ne sont pas linéaires à coup sûr dans la méthode Cooper-Jacob, et que dans la méthode Logan, la capacité spécifique étant égale à $(1.22)^{-1}$, il y a dépendance par rapport au débit. Elles ont donc pour origine les particularités des méthodes d'analyse.

Tableau 3-3-5 Liste des constantes hydrauliques

N° de forage	Nom du village	Longueur de crépine (m)	Capacité spécifique (m ³ /h/m)	Coefficient de transmissivité (m ² /hm)				Coefficient de stockage
				Méthode de Teis	Méthode de Jacob Cooper	Méthode de récupération	Logan(1964)	Méthode de Thiès
TM1	Ainou Mahdy	9,62	10,68	28,89	58,85	58,66	13,03	1,52E-11
TM2	Diawara 1	6,52	0,25	0,21	0,08	0,06	0,31	4,66E-03
TM3	Gande	5,72	50,00	134,46	345,93	379,74	61,00	2,16E-10
TM4	Diawara 2	6,71	3,44	7,01	2,02	6,61	4,20	3,45E-08
TM5	Ganguel Maka	22,91	1,27	0,52	0,50	0,46	1,56	5,00E+00
TM6	Yerimale	10,74	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	2,70E-02
TM7	Takoura	22,88	3,73	2,89	2,41	2,62	4,56	5,03E-01
TM8	Khossanto	11,46	0,03	0,05	0,04	0,01	0,04	2,69E-02
TM9	Medina Diakha	18,95	5,81	16,27	17,40	12,44	7,09	6,63E-11
TM10	Diana	17,13	0,21	1,44	0,19	4,81	0,26	6,04E-12
TM11	Thiengolele	12,34	2,60	22,97	17,25	16,19	3,18	5,89E-09
TM12	Soutouta	17,13	6,09	12,38	9,30	11,78	7,43	1,06E-07
TM13	Dindoudi Doka	11,36	39,23	104,54	115,69	93,75	47,87	2,03E-11

1) Développement des eaux souterraines dans la région limitrophe entre la zone de roches du socle et la zone de roches sédimentaires

Des forages d'essai ont été réalisés en 5 points dans la région limitrophe entre la zone de roches du socle et la zone de roches sédimentaires (Sud de Bakel : TM11, Est de Goudiry : TM1 et TM13, Sud-est de Goudiry : TM12, Sud de Goudiry : TM10). Tous ces points sont situés dans la zone de la couche sédimentaire, éloignée de 5 à 10 km de la ligne limitrophe de l'affleurement des roches du socle.

Les résultats de l'étude ont permis de comprendre que la profondeur des roches du socle était comprise entre 60 m et 88 m, qu'il existait une couche de sable de bonne qualité accumulée au-dessus des roches du socle et que la capacité spécifique était de 1 m³/h/m à 22 m³/h/m. Etant donné la faible différence de profondeur du niveau d'eau statique jusqu'à la profondeur des roches du socle, il sera nécessaire de déterminer les volumes de pompage en tenant compte de la profondeur d'installation des pompes.

On peut par conséquent considérer, qu'à l'exception de TM10, la construction d'ouvrages hydrauliques transférant l'eau jusqu'à la zone de roches du socle où l'exploitation des ressources en eau est difficile, est possible en utilisant les ressources en eau de la région limitrophe entre la zone de roches du socle et la zone de roches sédimentaires. A TM10 Diana, on a supposé que 28 m dans l'intervalle entre 60 et 88 m correspondait à une couche altérée. (Avec la méthode de forage à la boue, il est difficile de clairement distinguer la couche de sédiments de la couche extrêmement altérée étant donné que la vitesse de forage ne présente pas de changement.)

2) Structures de la zone de couche sédimentaire qui s'étend du long du fleuve Gambie à la zone de roches du socle

En raison des irrégularités entre les coefficients de transmissivité et des profondeurs de la couche Ma, mentionnés dans les rapports sur les forages existants, aucune concordance ne peut être admise. Il est par conséquent nécessaire de confirmer la présence ou non de la couche Ma, ainsi que la profondeur des roches du socle se trouvant sous cette couche. Une zone vierge de données a été sélectionnée comme site du forage d'essai TM9.

Etant donné qu'en résultat de l'étude, il a été possible de confirmer que la profondeur des roches du socle était inférieure d'environ 200 m aux 450 m supposés au départ, et que la profondeur du socle rocheux était supérieure à 250 m pour le forage d'essai KoarII de la Banque Mondiale, situé à 15 km à

l'ouest de ce village ; on a pu comprendre que le socle rocheux devenait brusquement plus profond en allant vers l'ouest. La couche de sable recouvrant les roches du socle était constituée de sable grossier blanc (1 à 3 mm), indice typique de la couche Ma. On a pu comprendre, à partir de là, que la répartition de la couche Ma indiquée dans les relevés d'excavation existants pour les forages des alentours était exacte.

Les données relatives à la répartition de la couche Ma pourront être utilisées pour les prévisions des profondeurs de l'aquifère lors du développement de nouvelles ressources en eau dans la région environnante.

(3) Détermination de la profondeur d'excavation dans la zone de roches du socle

1) Relations entre la profondeur d'excavation et le volume de pompage

A TM5 Ganguel Maka et TM7 Takoutara, lorsqu'une zone de fissures a été confirmée à une profondeur de 40 m à 50 m, des fissures ont été présentes dans les parties encore plus profondes, et le volume de pompage a dépassé les 10 m³/h. D'autre part, lorsque la première fissure a été confirmée à une profondeur comprise entre 70 et 80 m, il a été impossible de confirmer la deuxième fissure à de plus grandes profondeurs.

Etant donné qu'on ne peut pas envisager de forages productifs avec de gros volumes de pompage dans la zone de roches du socle, et que l'excavation est interrompue lorsque le volume de pompage possible par pompe manuelle est obtenu, la profondeur d'excavation est généralement fixée à 80 m environ maximum. Toutefois, on a également déterminé le fait qu'en excavant pour rechercher une fissure à une plus grande profondeur (80 à 140 m), il existait des possibilités d'obtenir de grands volumes de pompage.

2) Problèmes liés à la méthode MFT lorsque la profondeur d'excavation dépasse 100 m

Lorsque la profondeur de forage est supérieure à 100 m, la dureté du socle rocheux augmente et la capacité du compresseur s'avère insuffisante par rapport à l'augmentation de la pression d'eau. Par conséquent, la vitesse d'excavation se ralentit à l'extrême et la consommation en carburant augmente, faisant ainsi monter les coûts en flèche. A moins d'avoir pour objectif l'obtention de grands volumes de pompage, il est plus efficace de fixer comme valeur repère une profondeur d'excavation de 100 m. Il est par ailleurs possible d'envisager, pour contourner le problème énoncé ci-dessus, de réduire le diamètre d'excavation et d'adopter une finition sans étayage pour le forage. Toutefois, il est préférable d'installer un tubage et une crépine car même s'il s'agit d'une fissure des roches du socle, l'altération le long de la fissure est en progression dans certains cas.

(4) Relations entre les résultats de la prospection électrique et les quantités de recharge dans la zone de roches du socle

Les résultats de la prospection électrique au niveau de 2 forages ayant de grandes quantités de recharge (TM5 Ganguel Maka et TM7 Takoutara) n'ont pas montré d'irrégularités bien nettes ni de contrastes dans les structures de résistivité et il a été impossible de prévoir la répartition des aquifères. En revanche, à TM8 Khossanto, les structures de résistivité ont fait espérer de grandes quantités de recharge mais il s'est agi uniquement d'une fissure avec une petite quantité de recharge. On peut ainsi affirmer qu'il est difficile de prévoir les quantités de recharge sur la base des changements des structures de résistivité obtenus par la prospection électrique dans la zone des roches du socle.

(5) Répartition des couches alluvionnaires le long du fleuve Sénégal

1) Relations entre la distance à partir du fleuve et l'épaisseur de la couche alluviale

Les 2 points où des forages d'essai ont été effectués à Diawara (côté rive gauche) sont le point TM2 éloigné d'une distance de 700 m en direction perpendiculaire à partir des collines de la rive du fleuve, et le point TM4 à proximité des collines de la rive du fleuve. Dans la zone de répartition de la couche alluvionnaire, il est nécessaire, afin d'obtenir un forage productif, de confirmer jusqu'à un certain point l'épaisseur de la couche alluvionnaire mais pour TM2 qui est éloigné de la rivière, l'épaisseur de

cette couche n'a été que de 12 m à partir de la surface et elle a donc été insuffisante.

D'après les résultats des forages d'essai de cette étude, l'épaisseur de la couche alluvionnaire augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche du fleuve Sénégal, et une différence de profondeur du socle rocheux de 7 m a été confirmée entre TM2 et TM4 (700 m de distance). En outre, les niveaux d'eau statique ont été également différents, avec 2,9 m et 10,6 m, et le niveau d'eau statique de TM4 n'a pas de relations avec le niveau d'eau du fleuve.

2) Relations avec l'ancien lit du fleuve

Les résultats de la prospection électrique ont montré de fréquents changements du lit du fleuve et, par conséquent, une érosion profonde et étendue des roches du socle. On a donc supposé qu'une épaisse couche alluvionnaire (sédiments fluviaux) s'était déposée. Toutefois, les forages n'ont pas donné de résultats permettant de confirmer cette hypothèse et les roches du socle entre l'ancien lit et le lit actuel du fleuve sont à une profondeur inférieure à celle des berges du fleuve.

3) Direction des changements de l'épaisseur de couche alluvionnaire

A Gande, village situé en aval du village voisin de Galloude, les forages d'essai ont montré que l'épaisseur de la couche alluvionnaire était inférieure de 6 m par rapport à celle de Galloude en amont. En d'autres termes, les résultats n'ont pas montré une simple augmentation de l'épaisseur de la couche alluvionnaire au fur et à mesure de l'avancée en direction de l'ouest. On peut donc considérer que les roches du socle sont parfois profondes et parfois peu profondes. Les sources d'eau de Bakel en sont un exemple typique. A Bakel, les roches du socle affleurent et forment de petites collines mais à plusieurs kilomètres en amont du fleuve Sénégal, le socle se trouve à 25 m de profondeur en sous-sol, et les sédiments fluviaux le recouvrent directement. Il existe, dans cette couche alluvionnaire, une quantité de recharge couvrant l'approvisionnement en eau de Bakel.

3.3.3 Mesure du niveau des eaux souterraines

(1) Objectifs et méthodologie de l'étude

Les objectifs des mesures du niveau des eaux souterraines sont expliqués ci-après et la sélection des stations de mesure a été effectuée en août et en novembre 2008 en fonction de ces facteurs.

- Identification du niveau des eaux souterraines (en particulier l'aquifère Ma) dans l'ensemble de la zone de la couche sédimentaire dans la région de la présente étude en apportant un complément aux points de mesure du projet de la Banque Mondiale (Etude hydrogéologique à la limite de la couche sédimentaire dans la région est du Sénégal)
- Comparaison entre les niveaux des eaux souterraines des couches peu profondes et les niveaux des cours d'eau environnants
- Mesures continues du niveau des eaux souterraines aux points principaux

La méthode utilisée pour l'étude est présentée dans le Rapport de soutien (paragraphe 5.5) et des mesures ont été effectuées (1) une fois par semaine dans 11 puits avec des talimètres portables, (2) une fois par semaine dans 9 forages avec des talimètres portables et (3) en continu dans 3 forages avec des talimètres automatiques.

Les points de mesure sont présentés sur la figure ci-dessous. (Figure 3-3-3 et 3-3-5)

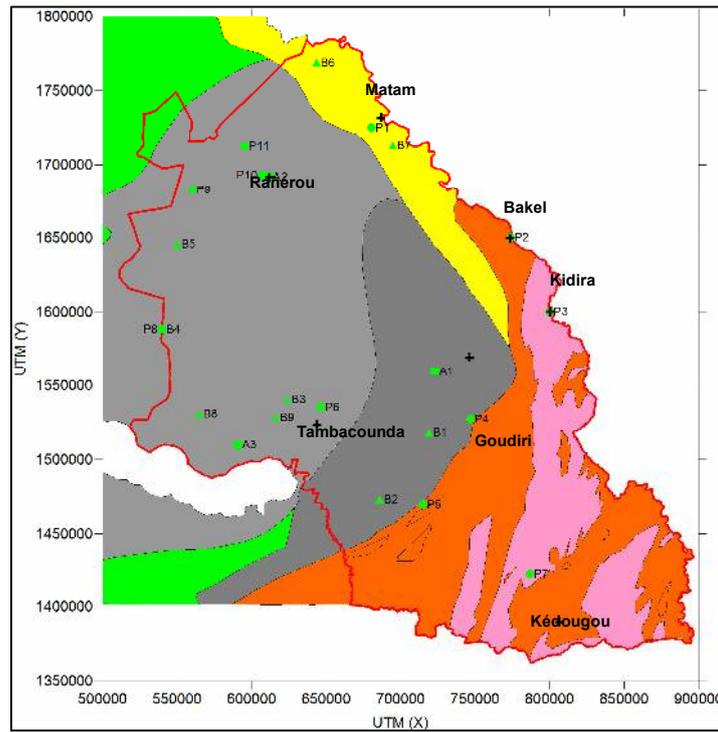


Figure 3-3-3 Carte de localisation des points de mesure du niveau des eaux souterraines

Tableau 3-3-6 Points des forages d'essai pour l'Étude hydrogéologique de la Bordure sédimentaire du Sénégal Oriental

No,	Village	ID_IRH	UTM (X)	UTM (Y)	Altitude (m)
Puits creusés à la main					
P1	OURO SOGUI		680 306	1 725 123	17,950
P2	BAKEL		773 636	1 650 199	24,744
P3	KIDIRA		799 937	1 600 202	31,180
P4	SOUTOUTA		746 897	1 527 139	85,030
P5	MANSADALLA		714 886	1 469 637	30,714
P6	MàYéL DIBI		646 688	1 535 074	23,093
P7	MAKO		786 846	1 422 010	82,298
P8	DAROU MANA		539 832	1 588 413	28,141
P9	NAKAR		560 229	1 682 875	36,250
P10	BELE NDENDI		606 787	1 693 220	28,900
P11	VENDOU KATANE		595 269	1 712 572	48,410
Forage					
B1	BANTANANI	20-1X-0001	718 946	1 518 140	93,212
B2	DIALACOTO	19-9X-0001	685 975	1 473 132	41,364
B3	BOUDOR BORDOR		623 971	1 540 170	33,133
B4	DAROU MANA	13-5X-0004	539 832	1 588 413	59,138
B5	BELEL TOUFFLE	13-2X-0002	550 171	1 645 732	19,080
B6	AGNAM CIVOL	08-2X-0004	643 560	1 768 720	7,400
B7	KANEL F4	08-6X-0011	694 685	1 713 056	25,120
B8	DIAGLE SINE	18-2X-0005	564 878	1 530 462	77,229
B9	SINTHIOU MALEME	19-1X-0003	616 249	1 528 300	14,910

No,	Village	ID_IRH	UTM (X)	UTM (Y)	Altitude (m)
Puits avec talimètres automatiques					
A1	BOYNGUEL BAMBA	15-7X-0001	723 111	1 559 478	74,892
A2	RANEROU		611 650	1 691 821	29,610
A3	FADIA KOUNDA	18-6X-0007	590 878	1 509 973	37,960

(2) Résultats des mesures par talimètre portable

Les résultats des mesures effectuées avec un talimètre portable sont présentés dans le Recueil de données. Ces mesures du niveau des eaux souterraines dans le cadre du présent projet ont été confiées aux habitants des villages et aux conducteurs des forages en état de marche mais elles manquent de précision. Parmi les raisons de ces imprécisions, on peut citer (1) des erreurs de lecture des données du talimètre au moment de la mesure et (2) le forage est productif et sa structure ne convient pas aux mesures. En outre, il se produit des fluctuations du niveau d'eau selon les heures des mesures dans les puits comme dans les forages ayant de grandes quantités de prise d'eau, comme indiqué dans le Tableau 3-3-7 (Les mesures devaient en principe avoir lieu avant la mise en service de la pompe, etc. Toutefois, les heures de mesures ont été décalées selon la convenance des responsables des mesures et les données correspondant probablement à des mesures après le démarrage du pompage sont incluses.)

Tableau 3-3-7 Exemple de différence de niveau des eaux souterraines selon les heures de mesure

P4 SOUTOUTA			B9 SINTHIU MALEME		
Date	Heure de mesure	Niveau des eaux souterraines (GL-m)	Date	Heure de mesure	Niveau des eaux souterraines (GL-m)
01/12/08	7:30	12,65	01/02/09	9:00	19,90
08/12/08	7:30	12,65	08/02/09	8:45	19,91
15/12/08	7:08	12,80	16/02/09	9:05	19,90
24/12/08	15:10	13,25	23/02/09	12:30	20,90
12/01/09	7:03	12,65	02/03/09	9:35	19,91
			09/03/09	9:20	19,96
			16/03/09	8:45	19,93
			23/03/09	7:45	19,94
			30/03/09	8:00	19,94

Le cas des mesures de B6 AGNAM CIVOL où des fluctuations saisonnières caractéristiques semblent apparaître en fonction des mesures du forage est présenté dans la Figure 3-3-4.

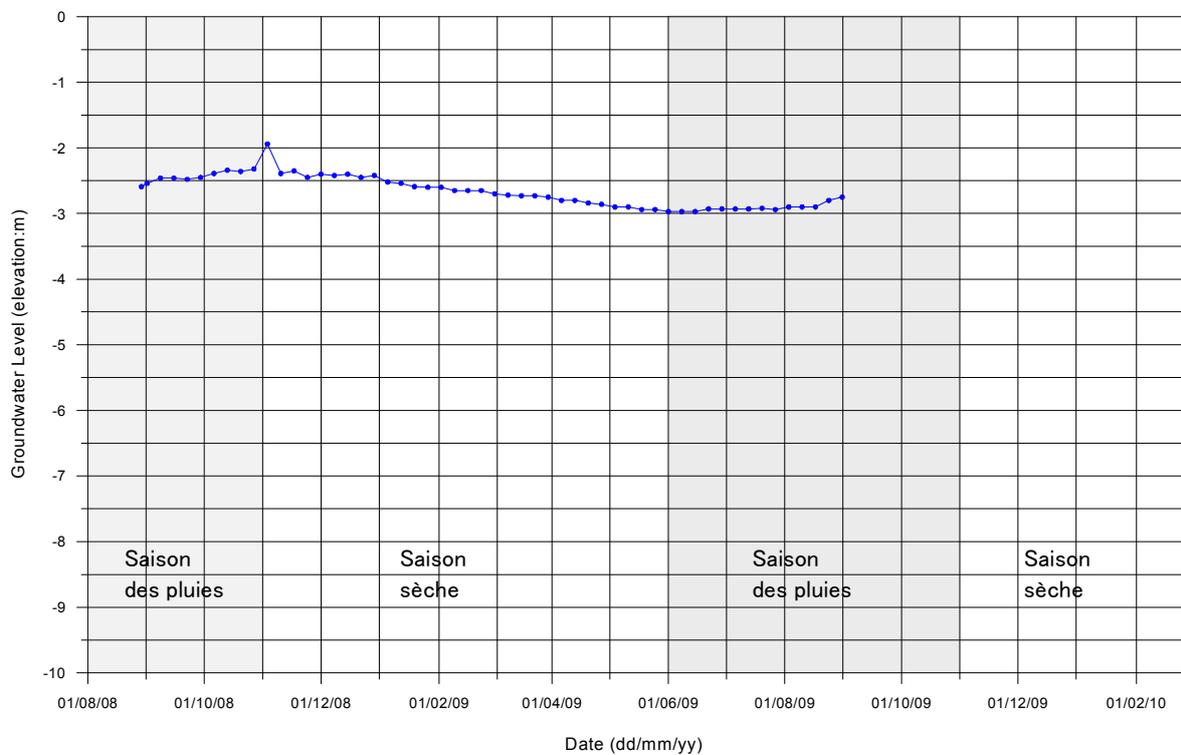


Figure 3-3-4 Exemple de fluctuations saisonnières du niveau des eaux souterraines (B6 AGNAM CIVOL)

3.3.4 Etude hydrologique (météorologie et débit des cours d'eau)

Comme indiqué précédemment, la DGPRES a effectué des mesures du débit des cours d'eau mais les données de mesure sont rares, sauf celles relatives aux zones le long du fleuve Sénégal et du fleuve Gambie.

Le détail des objectifs et des méthodes d'étude sont présentés dans le Rapport de soutien (paragraphe 6.1) mais les mesures du débit des cours d'eau ont été effectuées aux points indiqués dans la Figure 3-3-5 afin de compléter les données. Par ailleurs les détails des résultats de l'étude sont indiqués dans le Livret des données, mais les tendances générales des fluctuations du débit des cours d'eau peuvent se résumer de la manière suivante. (Voir Figures 3-3-6 – 3-3-9)

- Zone nord de la région de Matam : le niveau des eaux augmente brusquement puis baisse progressivement (Se reporter à R2 : Gourél Guéda).
- Zone ouest des régions de Matam et de Tambacounda : L'eau des cours d'eau apparaît de manière extrêmement provisoire (Se reporter à R11 : Mana).
- Zone sud-ouest de la région de Tambacounda : L'eau des cours d'eau apparaît de manière constante durant la saison des pluies. (Se reporter à R14 : Maka).
- Alentours de la frontière entre roches du socle et couche de sédiments : Les fluctuations du niveau d'eau sont importantes. Le niveau d'eau augmente progressivement dans certains points puis baisse de façon relativement brusque. (Se reporter à R28 : Soutouta).

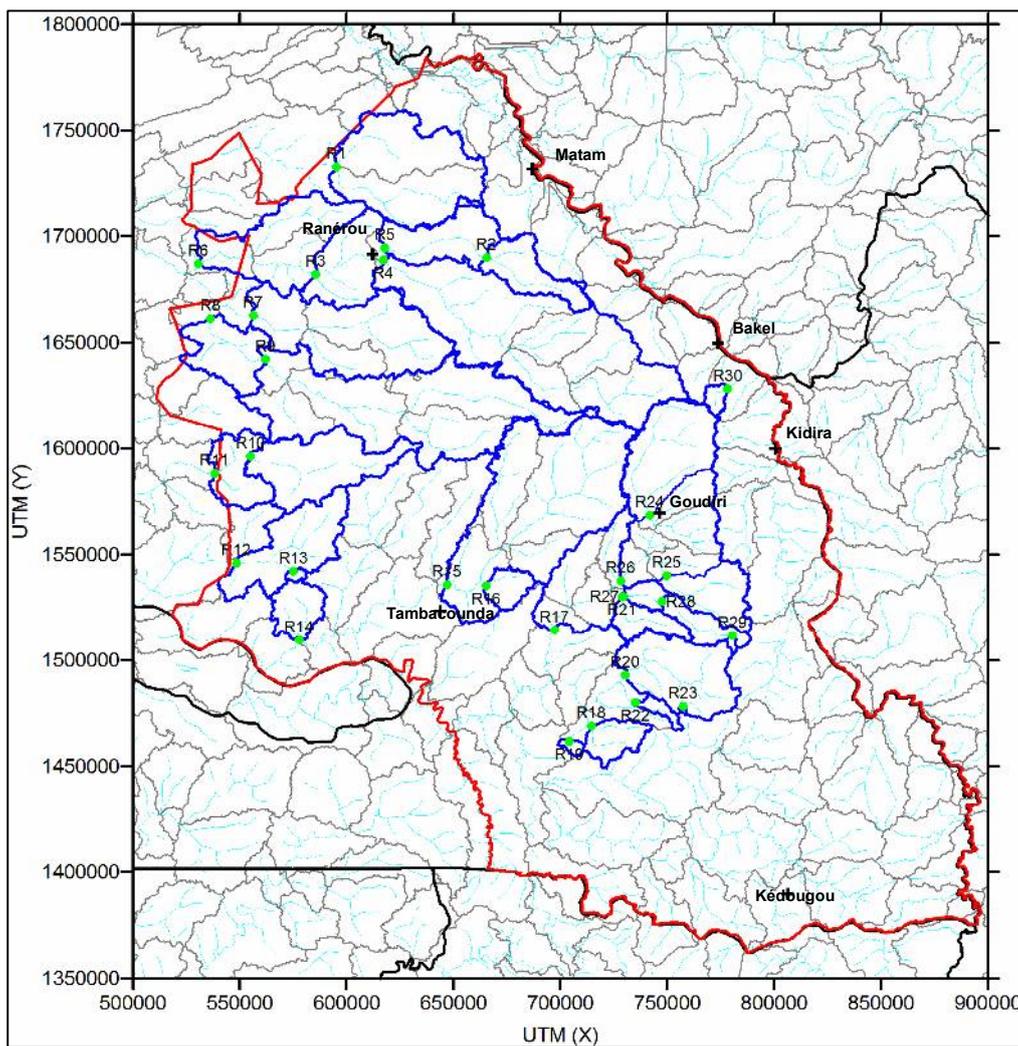


Figure 3-3-5 Carte de localisation des points de mesure du débit des cours d'eau

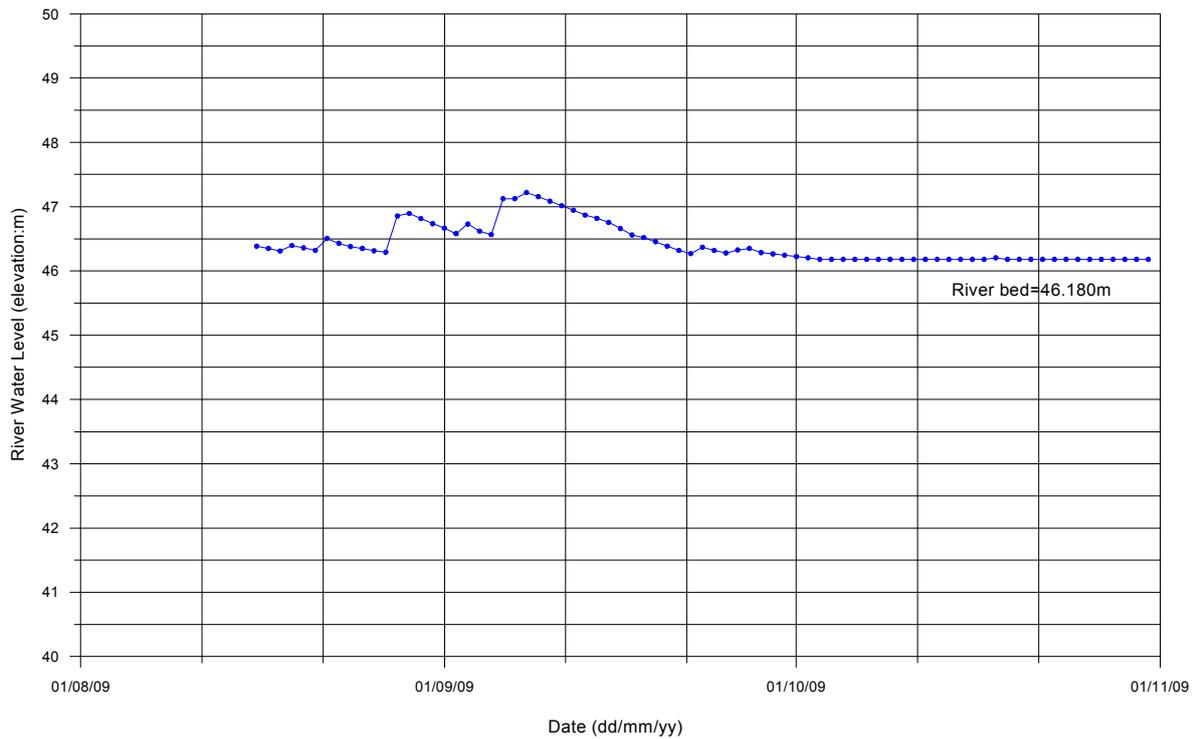


Figure 3-3-6 Exemple de fluctuations du niveau des eaux des cours d'eau dans la zone nord de la région de Matam (R2: Gourél Guéda)

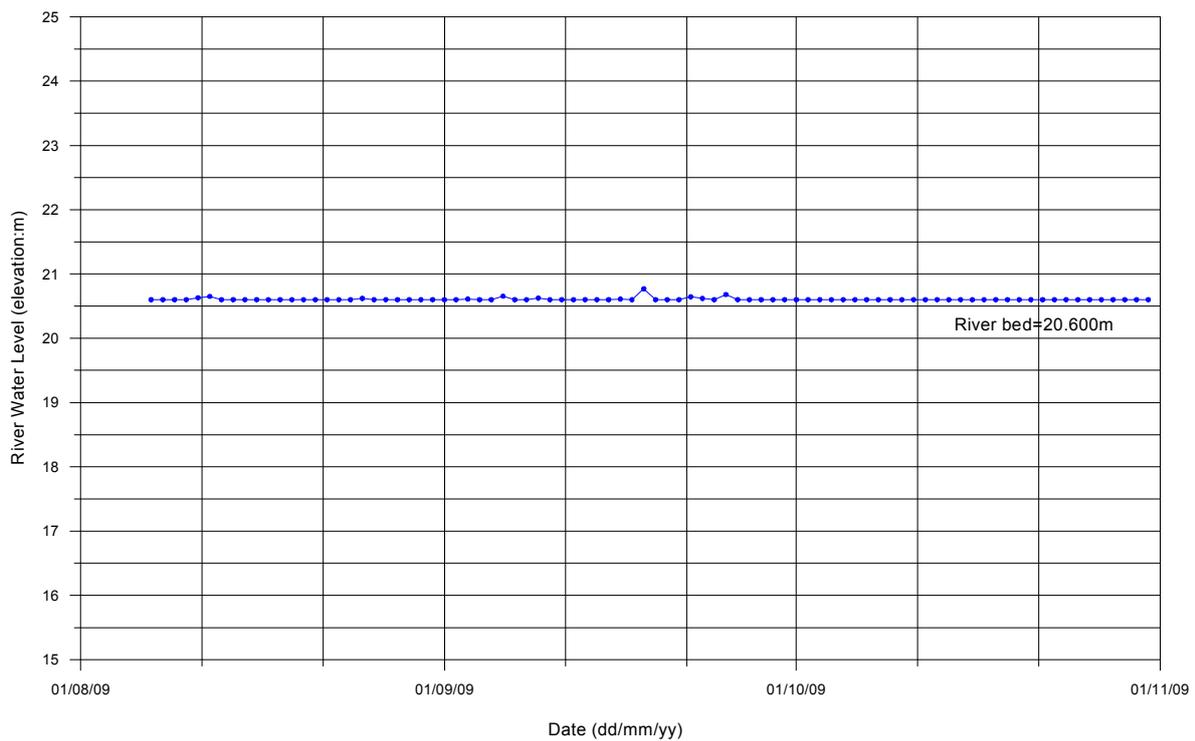


Figure 3-3-7 Exemple de fluctuations du niveau des eaux des cours d'eau dans la zone ouest des régions de Matam et de Tambacounda (R11: Mana).

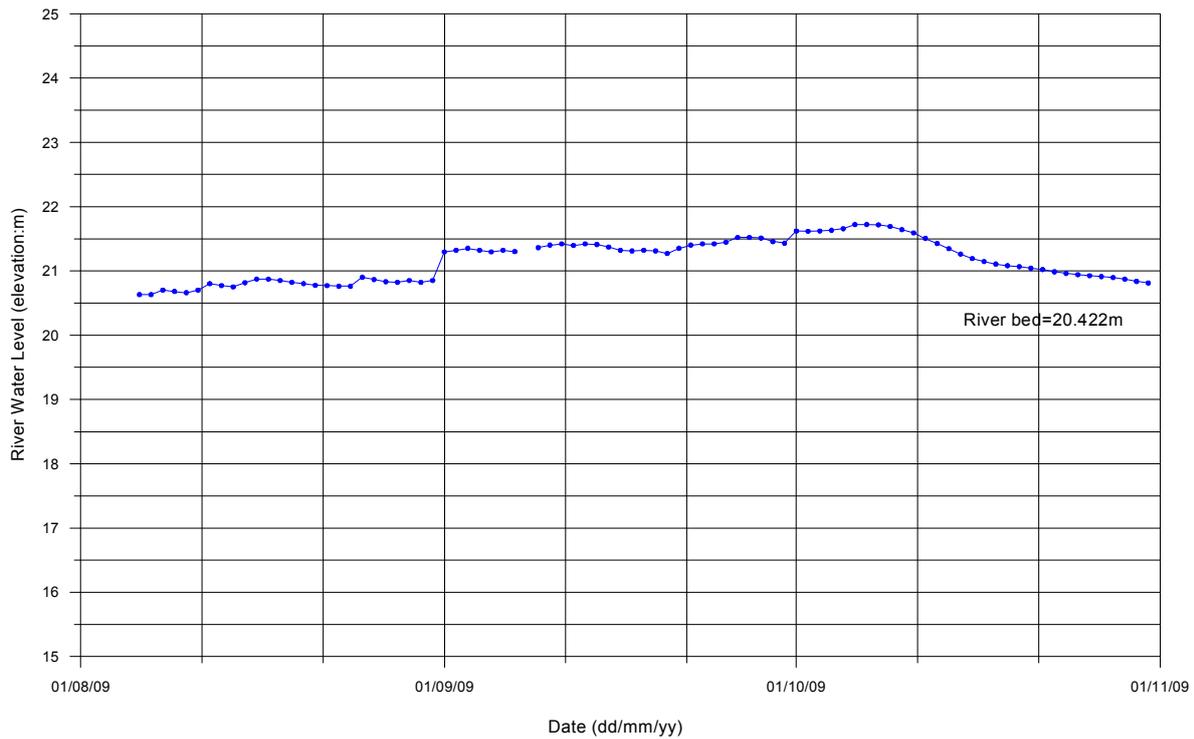


Figure 3-3-8 Exemple de fluctuations du niveau des eaux des cours d'eau dans la zone sud-ouest de la région de Tambacounda (R14 : Maka).

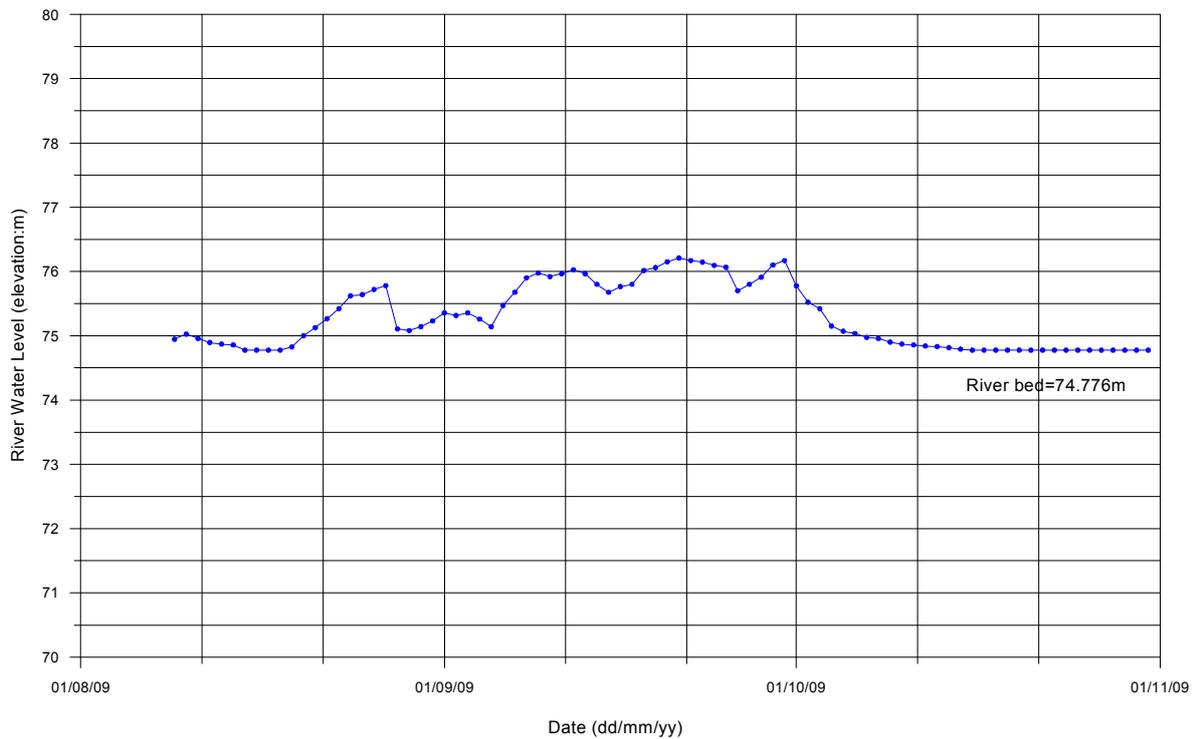


Figure 3-3-9 Exemple de fluctuations du niveau des eaux des cours d'eau aux alentours de la frontière entre roches du socle et couche de sédiments (R28: Soutouta).

3.4 Evaluation du potentiel des ressources en eau

3.4.1 Contenu de l'évaluation du potentiel des ressources en eau

(1) Les Eaux de surface

Le potentiel des eaux de surface et les volumes d'eau exploitable seront estimés en tenant compte des résultats de l'étude de la situation réelle de l'utilisation des eaux, des mesures du débit et de l'analyse du bilan hydraulique.

(2) Eaux souterraines dans les zones de roches sédimentaires

En ce qui concerne les eaux souterraines dans les roches sédimentaires, la cuvette des eaux souterraines sera évaluée conformément aux résultats de l'analyse du bilan hydraulique et de l'analyse hydrogéologique. La méthode de simulation de l'écoulement des eaux souterraines sera utilisée pour analyser l'influence sur le développement des eaux souterraines.

(3) Eaux souterraines dans les zones de roches du socle

Une étude a été menée sur une carte géologique à l'échelle 1/200 000ème, en prenant pour base la répartition des failles et des fissures, l'épaisseur de la couche altérée et les relations entre la répartition des forages existants et leur volume d'exhaure, obtenus à partir de la documentation existante ainsi que des résultats de la prospection géophysique et des forages d'essai, afin d'évaluer les possibilités de développement des eaux souterraines.

3.4.2 Estimation des volumes de recharge des eaux souterraines

(1) Modèles de réservoir

1) Structures du réservoir modèle

Comme procédé de calcul stochastique des volumes de recharge des eaux souterraines, nous avons appliqué la méthode d'analyse de l'écoulement par réservoir modèle ; celle-ci constitue une des données requise pour le calcul du modèle de simulation. Dans le présent projet, un modèle de type 4 x 4 auquel a été rajouté le modèle des structures des eaux du sol a été réalisé comme le montre la Figure 3-4-1. Par ailleurs, les détails concernant la méthode d'analyse par réservoir modèle sont indiqués dans le Rapport de soutien (paragraphe 6.1).

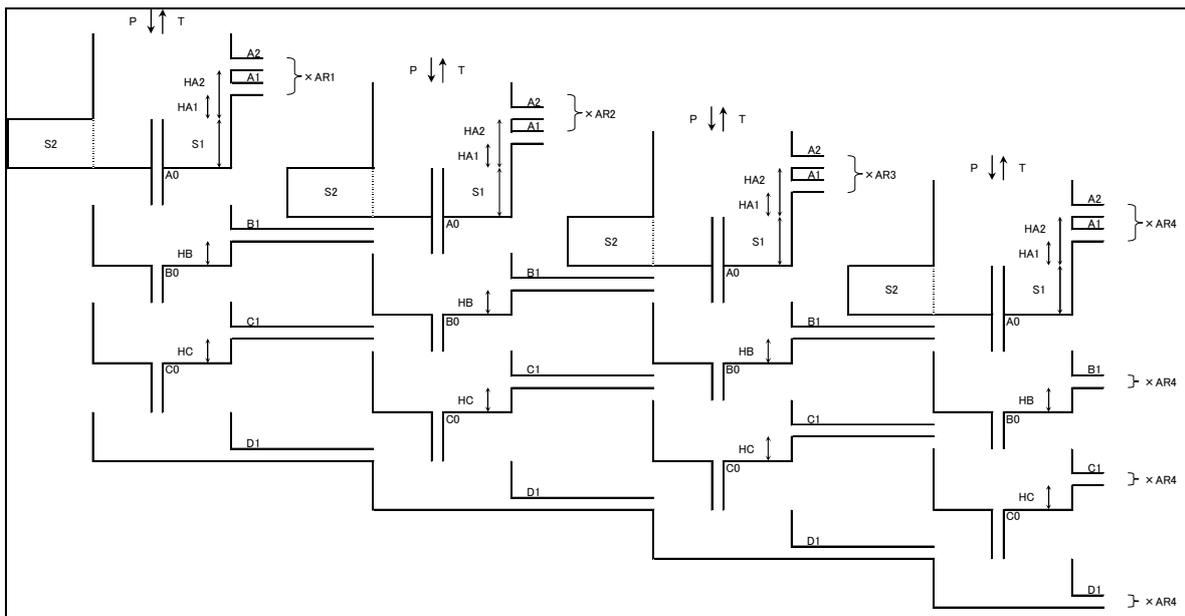


Figure 3-4-1 Plan conceptuel du modèle de réservoir appliqué dans la présente étude

2) Méthode d'estimation des volumes de recharge des eaux souterraines

Les volumes de recharge des eaux souterraines ont été estimés selon le procédé suivant.

- ① Division en zone (1) : les précipitations journalières et les volumes d'évapotranspiration journaliers possibles nécessaires à la saisie des modèles de réservoir ont été recherchés pour chacune des stations d'observation météorologique indiquées au Chapitre 3.2, et ont été considérés comme valeurs de saisie pour chaque zone divisée selon la méthode de Thiessen.
- ② Division en zone (2) : La région de l'étude a été divisée en zone de roches sédimentaires et en zone de roches du socle et une sub-division détaillée en 15 zones a été effectuée en les associant aux zones divisées en (1). (Voir le Tableau 3.4.1).

(La croix (×) dans le tableau ci-dessous indique que la zone n'est pas présente dans le champ de calcul du modèle.)

Tableau 3-4-1 Paramètres du modèle de réservoir

Division de Thiessen	zones de roches du socle	zone de roches sédimentaires
Matam	○	×
Semme	○	○
Ranérou	○	×
Bakel	○	○
Kidira	○	○
Goudiri	○	○
Tambacounda	○	×
Kédougou	×	○
Linguere	○	×
Dialakoto	○	○
Kenieba	×	×

- ③ Valeur paramètre des modèles de réservoir : une station d'observation dont le bassin ne chevauche pas plusieurs zones est sélectionnée respectivement pour les zones de roches sédimentaires et les zones de roches du socle parmi les zones divisées en (2) et, en effectuant une comparaison entre la valeur mesurée réelle et la valeur calculée des débits, les paramètres des modèles de réservoir indiqués dans le tableau ci-dessous (Tableau 3-4-2) ont été obtenus. Comme le montre la figure ci-dessous, la station d'observation de Naioule Tanou (Figure 3-4-2) a été prise comme exemple pour les zones de roches sédimentaires et la station de Mako (Figure 3-4-3) comme exemple pour les zones dans les roches du socle.

Tableau 3-4-2 Paramètres du modèle de réservoir

Paramètres		zones de roches du socle	zone de roches sédimentaires
Tank 1	A0	0,3	0,5
	HA0 (S1)	5mm	15mm
	A1	0,1	0,1
	HA1	10mm	95mm
	A2	0,1	0,05
	HA2	40mm	135mm
Tank 2	B0	0,05	0,4
	B1	0,2	0,02
	HB	4mm	5mm
Tank 3	C0	0,003	0,05
	C1	0,01	0,001
	HC	2mm	80mm
Tank 4	D1	0,001	0
Structure de l'eau du sol	S1	5	15
	S2	150	300
	K1	3	5
	k2	15	20
Division par zone	AR1	53,3	53,3
	AR2	26,7	26,7
	AR3	13,3	13,3
	AR4	6,7	6,7

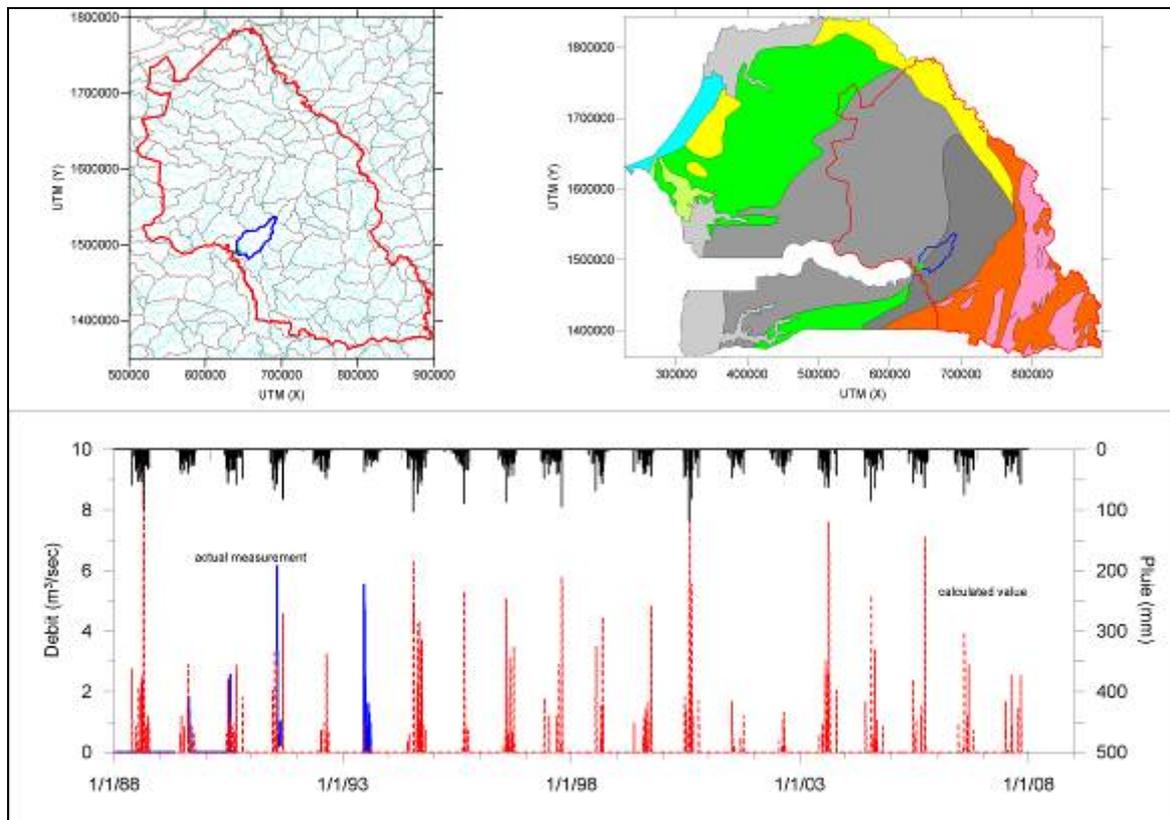


Figure 3-4-2 Analyse du modèle de réservoir dans les zones de roches sédimentaires (Station d'observation des débits de Naioule Tanou)

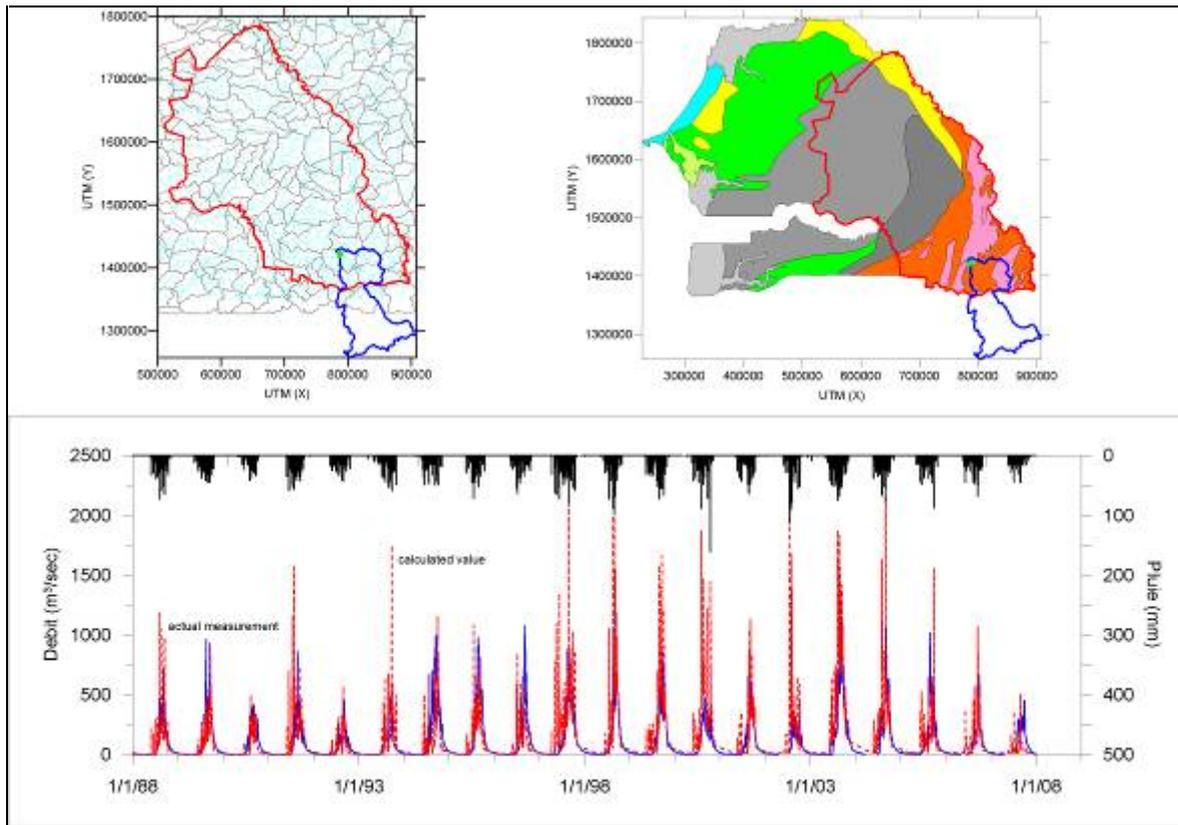


Figure 3-4-3 Analyse du modèle de réservoir dans les zones de roches sédimentaires (Station d'observation des débits de Mako)

- ④ Calcul par zone : Les paramètres obtenus en (3) sont fixés et en saisissant les précipitations journalières et les volumes d'évapotranspiration journaliers possibles de chacune des stations d'observation météorologique, les valeurs des volumes d'évapotranspiration réels, des débits des cours d'eau et des volumes de recharge ont été recherchées pour chacune des 15 zones subdivisées en (2). Les unités adoptées sont des calculs journaliers. Toutefois, en ce qui concerne les volumes de recharge des eaux souterraines, ils sont totalisés mensuellement et utilisés en tant que valeurs de saisie pour les volumes de recharge de simulation des eaux souterraines. La figure ci-dessous présente les divisions en zones saisies pour la simulation des eaux souterraines (Dans les régions ayant la même couleur, des volumes de recharge mensuels identiques ont été saisis.)

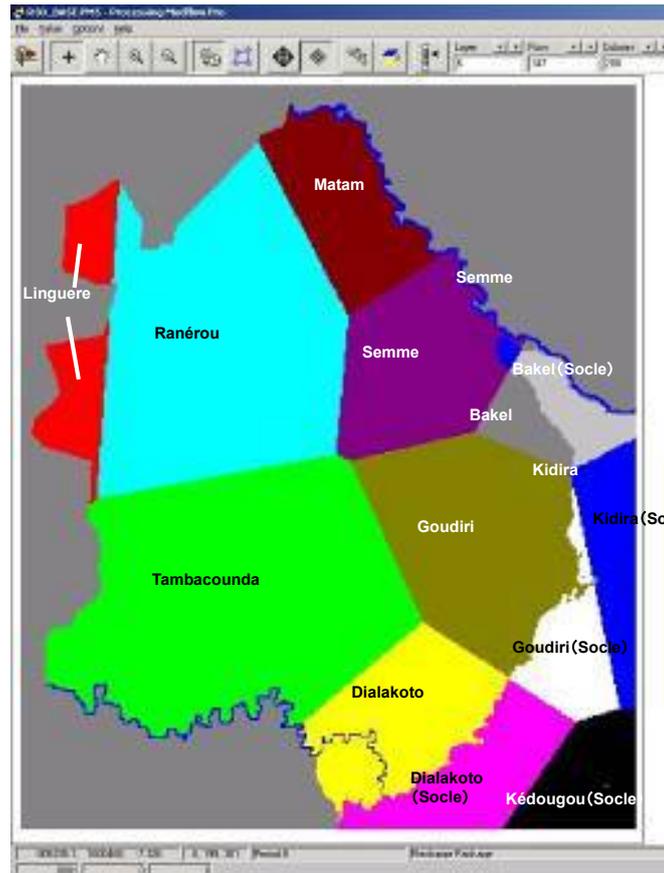


Figure 3-4-4 Division de la saisie des volumes de recharge mensuels

(2) Bilan hydraulique

Le bilan hydraulique des ressources en eau est généralement exprimé par l'équation suivante.

$$P = D + E + R$$

Dans laquelle,

P : précipitations

D : débit des cours d'eau

E : volumes d'évapotranspiration

R : volumes de recharge des eaux souterraines

Le calcul du bilan hydraulique a été effectué pour chacune des 15 zones en utilisant les valeurs de calcul recherchées dans "(4) calcul par zone" dans la méthode d'estimation des volumes de recharge des eaux souterraines du paragraphe précédent. Les calculs sont des calculs journaliers et les résultats des analyses du bilan hydraulique par superficie unitaire, totalisés par année, sont présentés dans le Tableau 3-4-3.

Par ailleurs, les valeurs moyennes entre 1988 et 2007 dans la région du présent projet par l'analyse de réservoir modèle présentent les caractéristiques suivantes.

- Précipitations : Les précipitations moyennes dans 10 stations d'observation climatiques de la région de l'étude sont comprises entre environ 450 et 1 050 mm.
- Volumes d'évapotranspiration réels dans la région de roches sédimentaires : entre 91,5% et 96,8% des précipitations.
- Volumes d'évapotranspiration réels dans la région de roches du socle : entre 72,0% et 96,4% des précipitations.

- Volumes d'écoulement des cours d'eau dans la région de roches sédimentaires : entre 0,0% et 0,9% des précipitations.
- Volumes d'écoulement des cours d'eau dans la région de roches du socle : entre 0,1% et 26,6% des précipitations.
- Volume de recharge des eaux souterraines dans la région de roches sédimentaires : entre 2,9% et 7,3% des précipitations.
- Volume de recharge des eaux souterraines dans la région de roches du socle : entre 0,6% et 3,3% des précipitations.

Tableau 3-4-3 Bilan hydraulique par surface unitaire selon l'analyse par réservoir modèle (moyenne de 20 ans entre 1988 et 2007)

Région	Précipitations (mm)	Evapotranspiration réelle		Débit des cours d'eau		Volume de recharge	
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
Matam (Sédiment)	440,6	403,3	91,5	3,9	0,9	32,0	7,3
Semme (Sédiment)	498,1	463,2	93,0	1,5	0,3	32,8	6,6
Semme (Socle)	498,1	419,4	84,2	75,2	15,1	0,4	0,9
Ranérou (Sédiment)	393,7	376,2	95,6	0,3	0,1	15,9	4,0
Bakel (Sédiment)	501,1	477,4	95,3	0,1	0,0	22,3	4,3
Bakel (Socle)	501,1	342,6	86,3	64,1	12,8	3,8	0,8
Kidira (Sédiment)	521,6	492,0	94,3	1,3	0,3	26,9	5,2
Kidira (Socle)	521,6	451,4	86,5	65,7	12,6	4,1	0,8
Goudiri (Sédiment)	548,6	531,1	96,8	0,1	0,0	15,9	2,9
Goudiri (Socle)	548,6	486,5	88,7	58,4	10,6	3,5	0,6
Tambacounda (Sédiment)	682,2	632,9	92,8	0,3	0,0	46,9	6,9
Kédougou (Socle)	1 064,1	765,9	72,0	283,1	26,6	35,3	3,3
Linguere (Sédiment)	301,8	290,7	96,4	0,4	0,1	9,5	3,2
Dialakoto (Sédiment)	614,8	584,0	95,0	0,3	0,1	28,8	4,7
Dialakoto (Socle)	614,8	530,5	86,3	77,8	12,7	5,7	0,9

Comme indiqué ci-dessus, le pourcentage d'évapotranspiration réelle par rapport aux précipitations est élevé, allant d'environ 72% à 97%, et le volume d'évapotranspiration réelle estimé dans la région concernée est compris entre 290,7 mm et 765,9 mm (moyenne sur 20 ans, de 1988 à 2007). Ces valeurs de 290,7 mm et 765,9 mm correspondent à environ 15% à 43% du volume d'évapotranspiration possible (Tableau 3-4-4), elles ne sont pas excessives en comparaison avec les exemples d'estimation¹ sur le continent africain et montrent, en revanche, qu'en raison des faibles précipitations, il n'y a pas suffisamment d'eau pour l'évaporation ni pour la recharge.

¹ Par exemple, Masami Sugawara qui a proposé les réservoirs modèles utilise le terme de volume d'évaporation mais il mentionne que "la valeur approximative pour le volume d'évaporation est d'environ de 700 mm par an pour le Japon, de 300 à 500 mm pour l'Europe, et de 1 300 à 1800 mm pour les régions tropicales". (Sugawara et al.) (1968 : Programme de réservoir modèle pour ordinateur personnel et méthode d'utilisation – Compte rendu d'étude du National Research Institute for Earth Sciences and Disaster Prevention)

Tableau 3-4-4 Comparaison des résultats des estimations des volumes d'évapotranspiration réelle et d'évapotranspiration possible par superficie unitaire selon l'analyse de réservoir modèle (moyenne sur 20 ans, de 1988 à 2007)

Région	Précipitations (mm)	Evapotranspiration possible (mm)	Evapotranspiration réelle		Evapotranspiration réelle / Evapotranspiration possible (%)
			(mm)	(%)	
Matam (Sédiment)	440,6	1 930,9	403,3	91,5	20,9
Semme (Sédiment)	498,1	1 930,9	463,2	93,0	24,0
Semme (Socle)	498,1	1 930,9	419,4	84,2	21,7
Ranérou (Sédiment)	393,7	1 913,8	376,2	95,6	19,7
Bakel (Sédiment)	501,1	1 927,8	477,4	95,3	24,8
Bakel (Socle)	501,1	1 927,8	342,6	86,3	22,4
Kidira (Sédiment)	521,6	1 927,8	492,0	94,3	25,5
Kidira (Socle)	521,6	1 927,8	451,4	86,5	23,4
Goudiri (Sédiment)	548,6	1 930,5	531,1	96,8	27,5
Goudiri (Socle)	548,6	1 930,5	486,5	88,7	25,2
Tambacounda (Sédiment)	682,2	1 915,9	632,9	92,8	33,0
Kédougou (Socle)	1 064,1	1 792,3	765,9	72,0	42,7
Linguere (Sédiment)	301,8	1 913,8	290,7	96,4	15,2
Dialakoto (Sédiment)	614,8	1 915,9	584,0	95,0	30,5
Dialakoto (Socle)	614,8	1 915,9	530,5	86,3	27,7

3.4.3 Calcul stochastique des volumes de pompage des eaux souterraines

(1) Méthode de calcul

L'estimation des volumes de pompage des eaux souterraines a été effectuée selon les orientations et les méthodes suivantes. Par ailleurs, les prévisions sur les volumes de pompage des eaux souterraines à l'avenir sont indiquées dans le Chapitre 8.

- ①. Les volumes d'exhaure des AEP prenant les eaux souterraines comme ressources correspondront aux volumes saisis dans les modèles de simulation. Les volumes de prise d'eau à partir des puits et des PMH ne seront pas pris en considération car ils n'ont pratiquement aucune influence sur les calculs de simulation.
- ②. Les volumes d'exhaure sont calculés en multipliant la population desservie par les unités d'approvisionnement en eau. Toutefois, étant donné la nécessité d'ajouter les besoins du bétail comme indiqué au Chapitre 4 Orientation du Plan directeur, la population desservie sera calculée en tant que "population du village + population du village x 2,57". (Base du calcul : Têtes de bétail/pourcentage de population = 2,57, établie par la Direction de l'Elevage et utilisée par la DHR lors de l'élaboration du Plan d'approvisionnement en eau)
- ③. Les unités d'approvisionnement en eau sont au maximum de 35 L/personne et, pour les fluctuations mensuelles, la valeur enregistrée au mois de mai 1,0 est considéré comme la valeur maximale conformément aux résultats des volumes d'exhaure dans la région de Tambacounda entre 2004 et 2007, les autres mois étant indiqués dans le Tableau 3-4-5.

Tableau 3-4-5 Volumes d'exhaure

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Taux	0,88	0,87	0,93	0,97	1,00	0,83	0,53	0,43	0,47	0,58	0,67	0,74

④. Les calculs seront effectués en prenant 0 comme pourcentage de croissance de la population des villages.

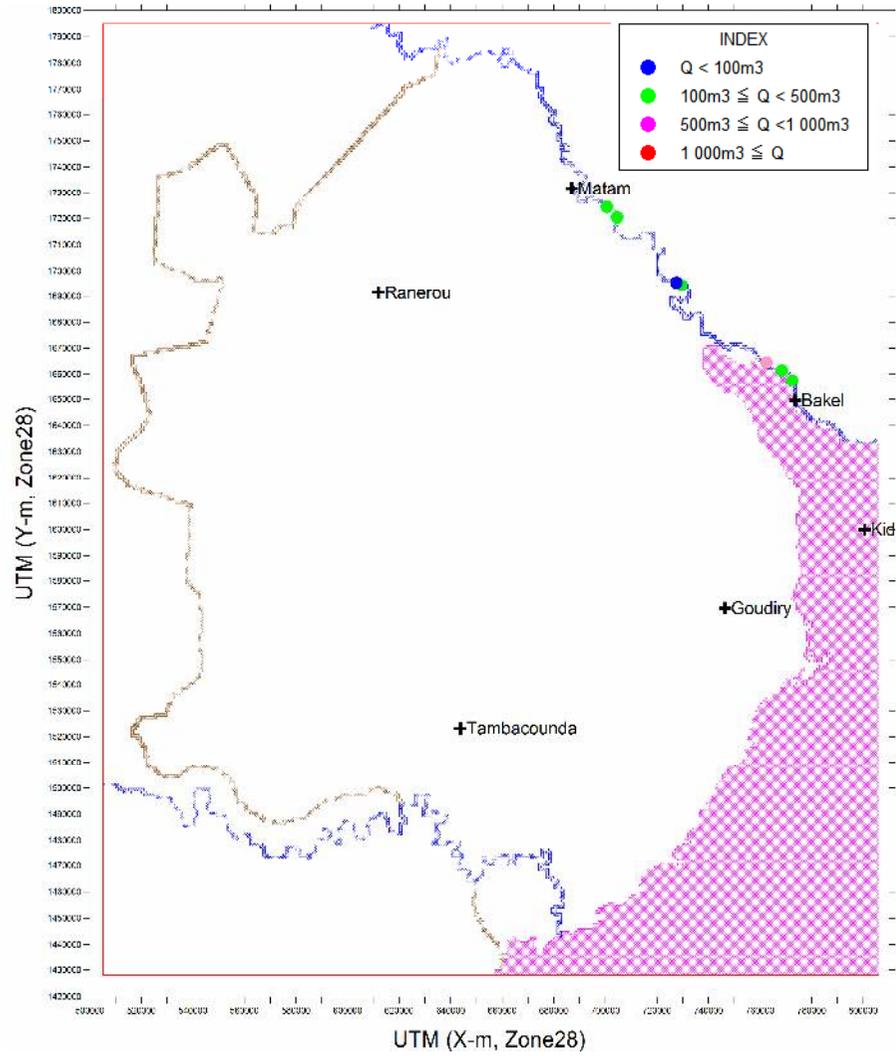
(2) Résultats du calcul stochastique

Les volumes de pompage de chaque installation d'adduction d'eau ont été calculés conformément aux orientations et méthodes ci-dessous mentionnées, les volumes de pompage mensuels ont été totalisés par aquifère et par quadrillage pour obtenir les valeurs de saisie du modèle de simulation. L'exemple de la répartition des volumes de pompage (répartition des volumes de pompage en mai 2007) est indiqué dans la Figure 3-4-5.

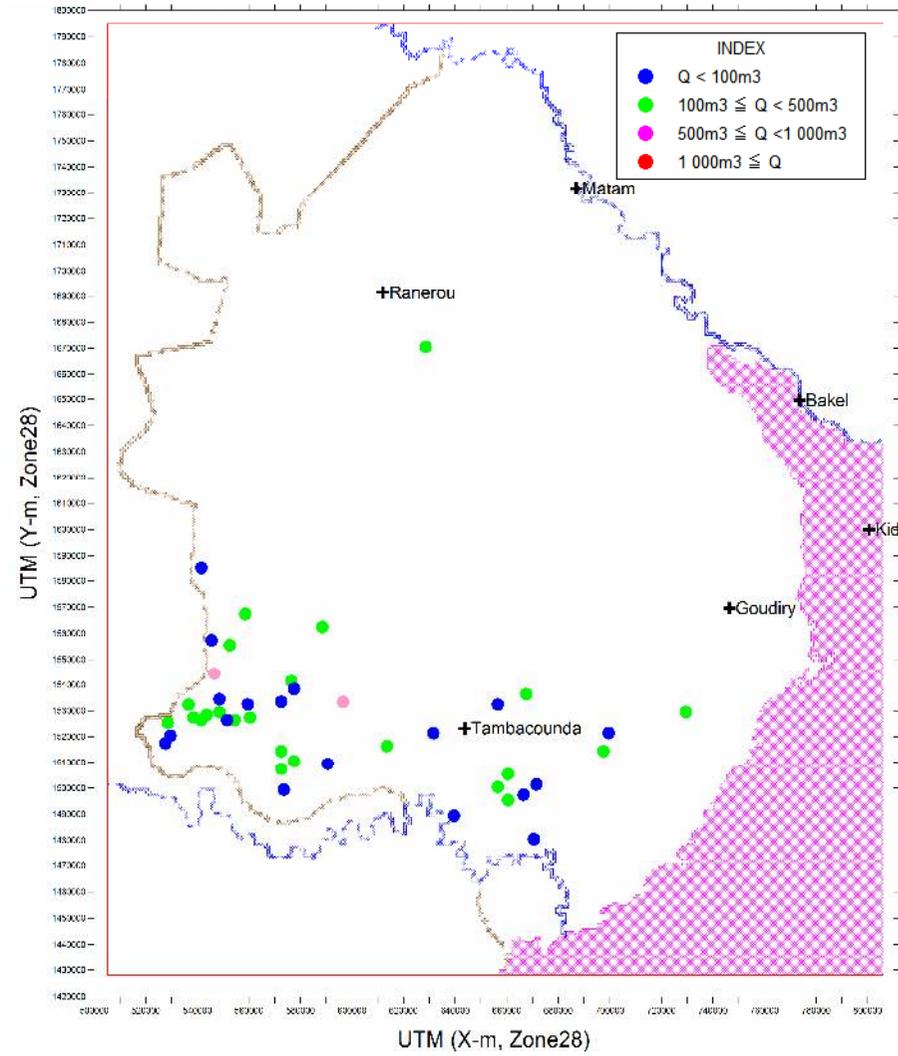
La comparaison entre les valeurs estimées pour les volumes de pompage des eaux souterraines et les volumes de recharge des eaux souterraines recherchés dans le paragraphe précédent a été résumée dans le Tableau et les Figures ci-dessous. (Tableau 3-4-6, Figures 3-4-6~3-4-7)

Par ailleurs, les caractéristiques des volumes de pompage des eaux souterraines dans la région du présent projet sont telles qu'indiquées ci-dessous.

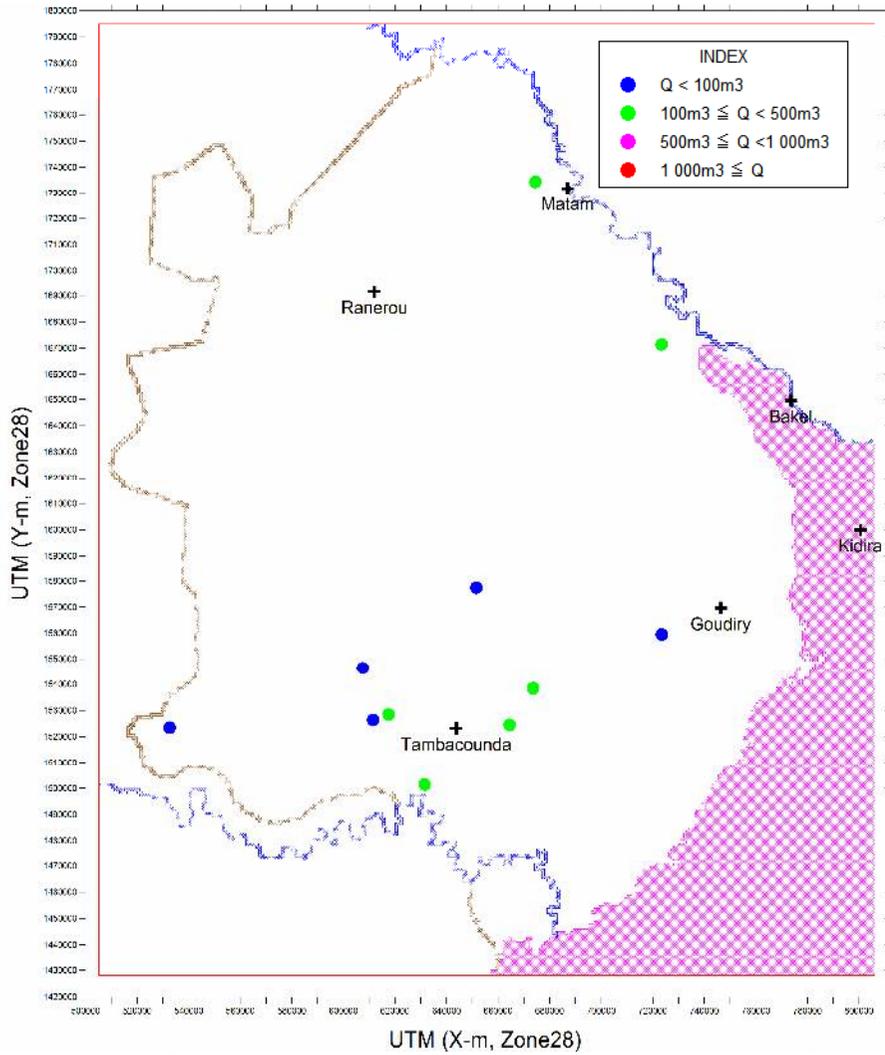
- Des ouvrages hydrauliques ont été construits après les années 1990 mais de nombreuses installations sont à l'arrêt et aucune augmentation des volumes de pompage des eaux souterraines n'a été constatée.
- D'après la moyenne sur 20 ans, les volumes de pompage des eaux souterraines ne correspondent qu'à 0,6% des volumes de recharge.
- Les pourcentages des volumes de pompage des eaux souterraines par rapport aux volumes de recharge de ces eaux sont de 0,2% au minimum en 1988 et de 7,0% au maximum pour l'année 2002.



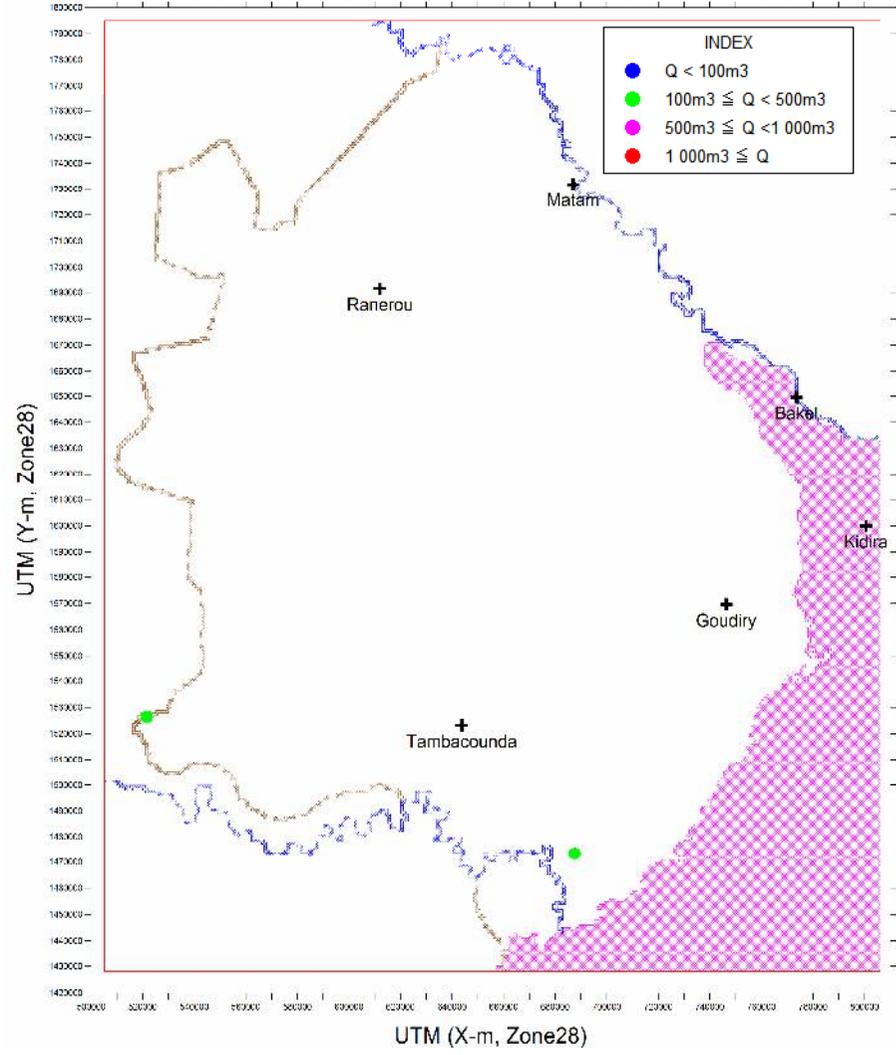
(Répartition des volumes de pompage de la Couche Q)



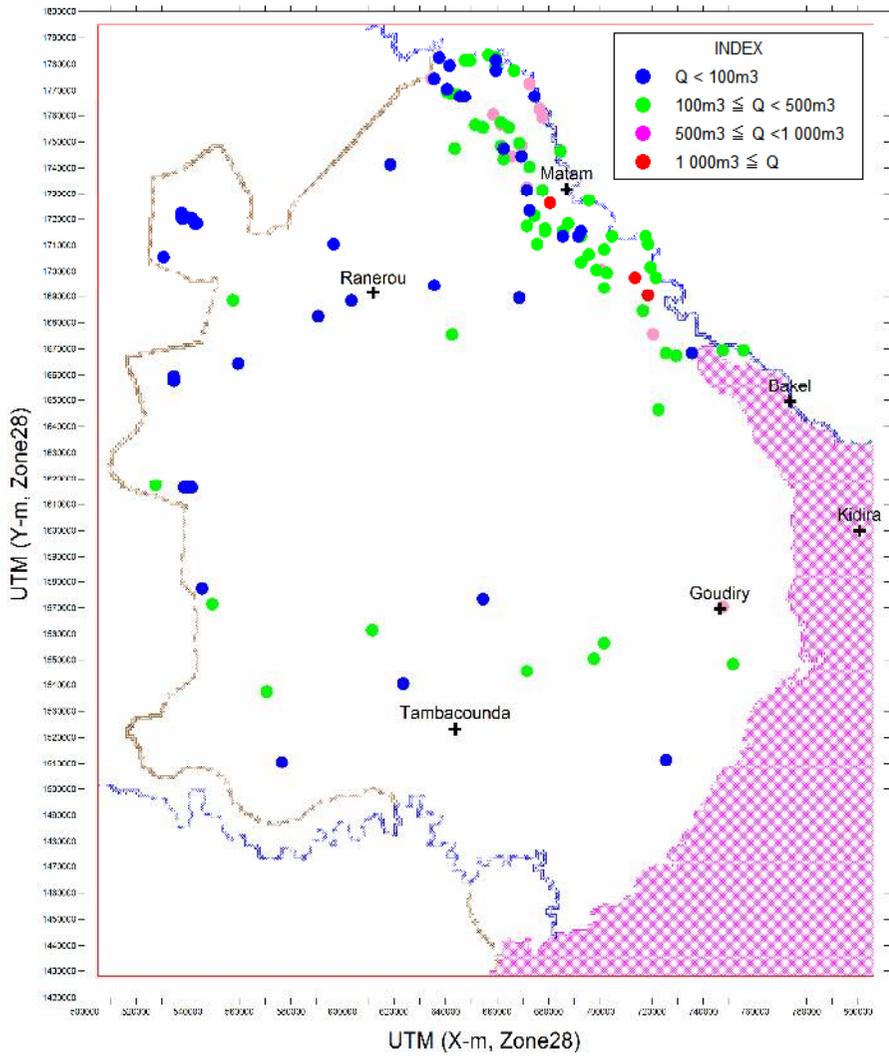
(Répartition des volumes de pompage de la Couche Co)



(Répartition des volumes de pompage de la Couche Eo)



(Répartition des volumes de pompage de la Couche Pa)



(Répartition des volumes de pompage de la Couche Ma)

Figure 3-4-5 Exemple de la répartition des volumes de pompage (mai 2007)

Tableau 3-4-6 Volumes de recharge des eaux souterraines (précipitations)
 et volumes de pompage des eaux souterraines

Année	Volume de recharge (m ³ /an)	Volume de pompage (m ³ /an)						Volume pompage/ volume recharge
		Couche du Quaternaire	Couche Continentale Terminal	Eocène	Paléocène	Couche du Maastrichtien	Total	
1988	4 072 657 154	164 453	2 041 843	273 536	0	5 540 639	8 020 471	0,2%
1989	813 702 210	180 231	2 034 886	288 191	0	5 536 472	8 039 780	1,0%
1990	472 688 770	180 231	2 034 886	288 191	0	5 934 207	8 437 515	1,8%
1991	762 081 202	271 933	2 034 886	288 191	0	6 453 678	9 048 688	1,2%
1992	681 920 090	311 573	2 075 480	318 360	59 193	6 574 195	9 338 801	1,4%
1993	413 665 640	289 037	2 089 423	315 738	84 566	6 456 712	9 235 476	2,2%
1994	3 584 843 220	310 582	2 095 003	322 124	101 888	6 684 812	9 514 409	0,3%
1995	1 001 058 900	310 582	2 095 003	322 124	101 888	6 684 812	9 514 409	1,0%
1996	1 999 556 230	311 573	2 114 672	323 152	102 213	6 764 243	9 615 853	0,5%
1997	587 334 260	310 582	2 116 813	322 124	101 888	6 767 409	9 618 816	1,6%
1998	1 368 170 370	310 582	2 114 643	322 124	98 261	6 745 957	9 591 567	0,7%
1999	1 085 298 130	310 582	2 116 813	322 124	101 888	6 767 409	9 618 816	0,9%
2000	1 777 965 022	311 573	2 110 755	323 152	102 213	6 782 473	9 630 166	0,5%
2001	224 862 720	310 582	2 148 820	322 124	101 888	6 795 177	9 678 591	4,3%
2002	138 958 880	310 582	2 158 307	322 124	101 888	6 785 274	9 678 175	7,0%
2003	3 315 577 072	310 582	2 039 429	322 124	101 888	6 937 508	9 711 531	0,3%
2004	4 138 338 950	311 573	2 037 291	323 152	102 213	6 978 623	9 752 852	0,2%
2005	1 200 346 080	310 582	2 001 405	322 124	101 888	6 992 174	9 728 173	0,8%
2006	526 235 720	310 582	1 923 210	322 124	101 888	7 084 733	9 742 537	1,9%
2007	964 811 500	310 582	1 840 401	322 124	101 888	7 179 475	9 754 470	1,0%
Moyenne	1 456 503 606	287 429	2 061 198	314 251	78 377	6 622 299	9 363 555	0,6%

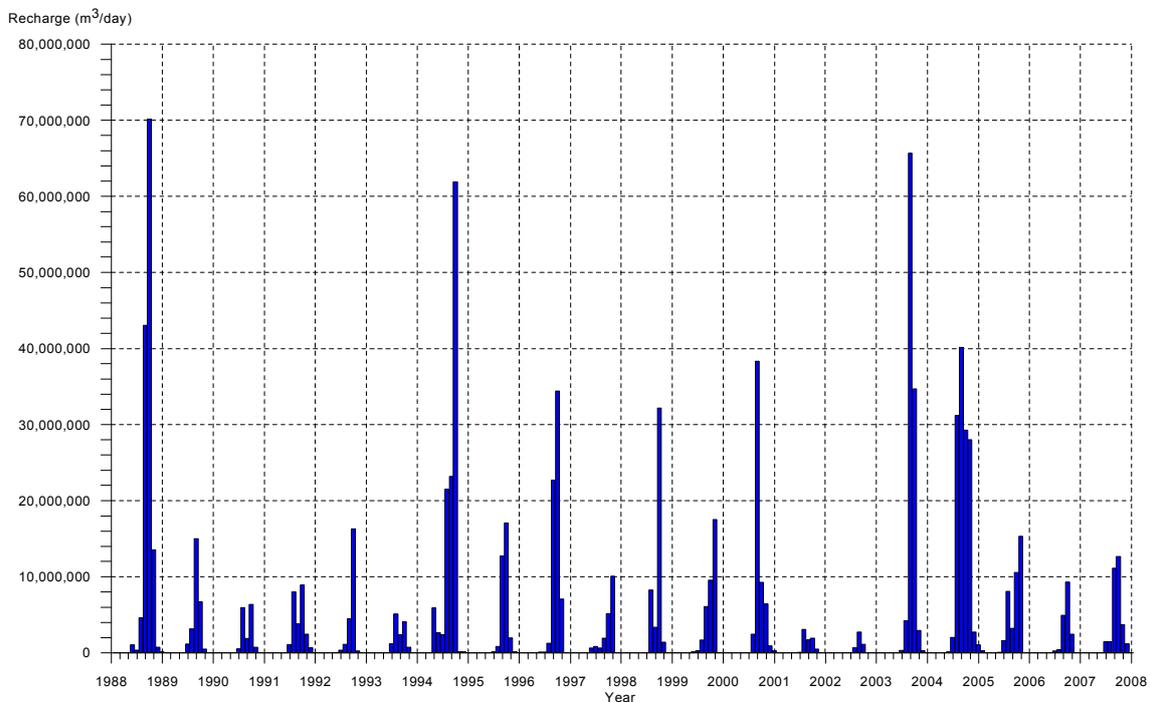


Figure 3-4-6 Volumes mensuels de recharge des eaux souterraines (précipitations)

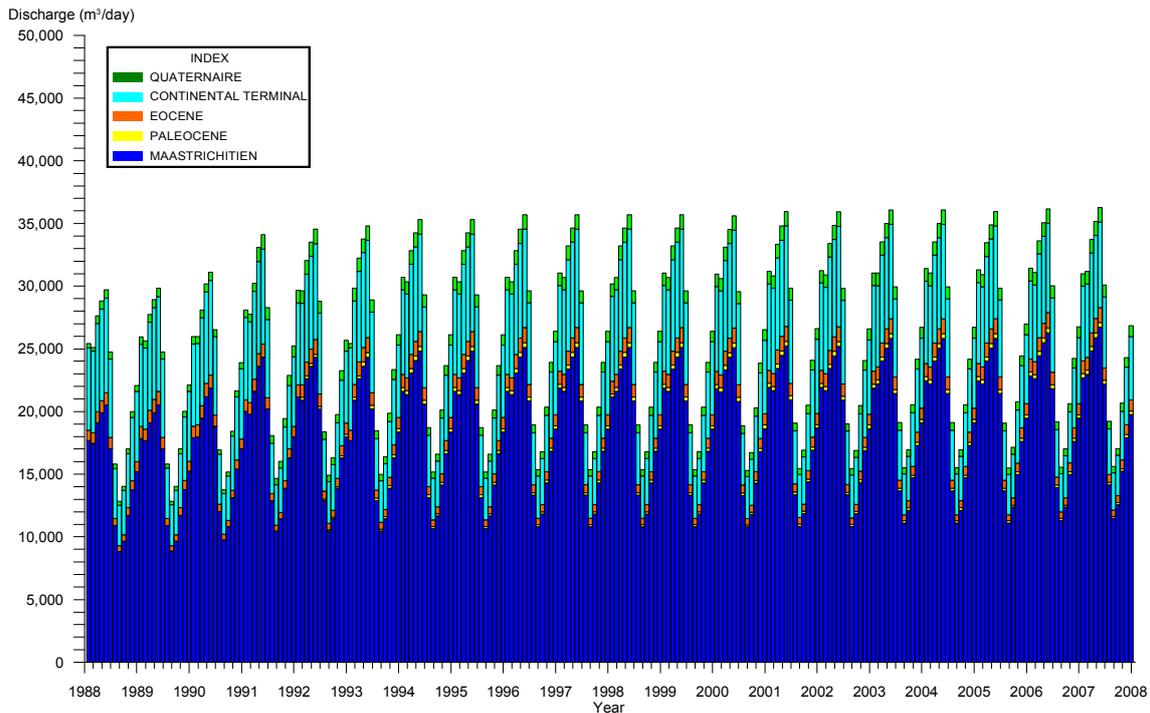


Figure 3-4-7 Volumens mensuels de pompage des eaux souterraines

3.4.4 Modèle de simulation

Les détails relatifs au modèle de simulation sont présentés dans le Rapport de soutien (paragraphe 6). Le présent Rapport principal décrit les généralités de l'analyse du modèle de simulation.

(1) Procédure de modélisation des eaux souterraines

La modélisation des eaux souterraines s'est faite selon la procédure suivante. Dans le présent projet, nous avons présenté les processus. L'évaluation de la modélisation après la fin du projet se fait généralement environ tous les dix ans pour une révision du modèle. (Figure 3-4-8)

1) Détermination des objectifs

Les objectifs du modèle sont établis et l'équation de contrôle ainsi que le programme à sélectionner sont déterminés.

2) Modèle conceptuel

Un modèle général du système est élaboré. Les unités hydrogéologiques et les limites du système sont déterminées et les informations relatives au bilan hydraulique ainsi que les données, comme les constantes des aquifères, sont intégrées. Une place importante est accordée aux résultats de l'étude sur site, notamment, les enquêtes sur site et les forages d'essai.

3) Sélection du programme

L'équation de contrôle et le programme (code) sont sélectionnés. Dans la présente étude, le code MODFLOW a été choisi pour l'analyse de simulation de l'écoulement des eaux souterraines, et le logiciel global "Processing Modflow Pro" (réalisé par la société Webtech) intégrant MODFLOW 2000 et MT3DMS qui est un code de simulation de transfert physique, a été utilisé.

4) Conception du modèle

Le modèle général est exprimé sous une forme convenant à la modélisation. A cette étape, on procède à la conception du quadrillage, à la sélection des divisions horaires, à la sélection des conditions limites et des conditions initiales, ainsi qu'à la sélection de valeurs approximatives pour les constantes des aquifères et la charge hydrologique.

5) Essais d'interpolation et vérification

Les valeurs sont recherchées par des essais d'interpolation pour les constantes des aquifères et la charge hydrologique, en prenant des hauteurs d'eau et des débits similaires mesurés en site. Les essais d'interpolation sont généralement effectués soit par ajustement des paramètres en procédant au jugé soit à l'aide d'un programme de supposition automatique des paramètres. C'est la méthode par tâtonnement qui a été utilisée pour la présente étude.

6) Prévisions

Les prévisions correspondent à une évaluation quantitative de la réponse des systèmes des eaux souterraines par rapport aux événements futurs. Les valeurs relative à une future évolution de la charge hydrologique sont introduites dans un modèle élaboré sur la base des valeurs des paramètres obtenus par les essais d'interpolation, et les charges hydrologiques futures sont évaluées.

7) Indication des résultats

La conception et les résultats du modèle sont indiqués clairement afin de transmettre de manière efficace les travaux de modélisation.

8) Evaluation ultérieure

Une évaluation ultérieure est effectuée plusieurs années après la fin de la modélisation. De nouvelles données sont collectées sur site afin de vérifier si les prévisions étaient correctes ou non. Si les prévisions du modèle sont exactes, ce modèle est confirmé pour une région déterminée.

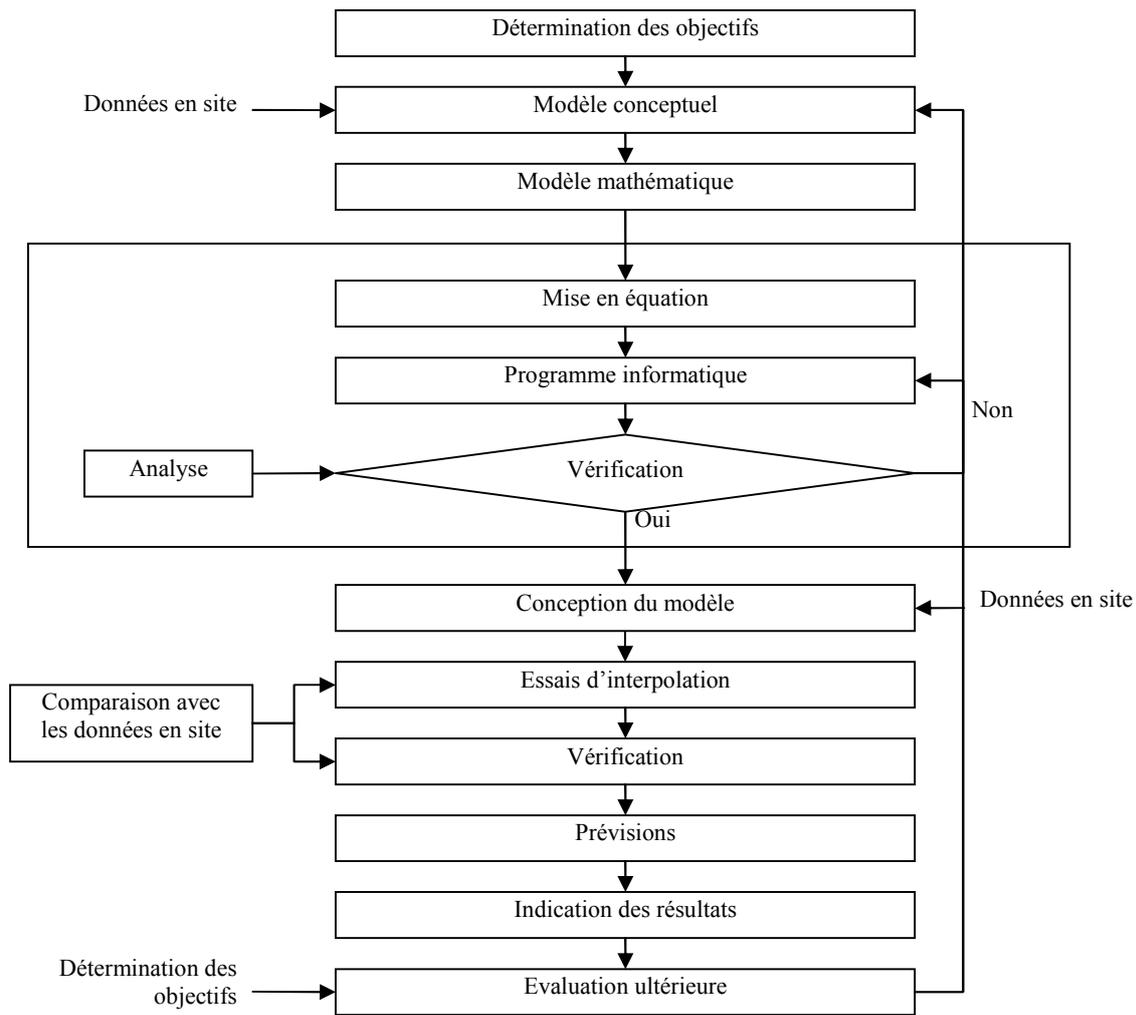


Figure 3-4-8 Procédure de modélisation
 (Source : Modèles des eaux souterraines (Traduit par Kan Fujinawa, 1984))

(2) Utilisation des résultats d'analyse

Dans les objectifs des analyses par simulation réalisées dans le présent projet, sont inclus (1) la sélection des régions où le développement des eaux souterraines est possible (soustraction des régions où le développement des eaux souterraines est difficile) et (2) la sélection des aquifères permettant le développement des eaux souterraines. Dans le présent projet, comme le montre la Figure 3-4-9, des analyses de simulation ont été effectuées, en menant parallèlement l'étude de la pertinence de l'emplacement des sources d'eau prévues dans le PD et des couches permettant la prise d'eau. Par ailleurs, les résultats des analyses allant jusqu'à l'analyse de fragilité et utilisant les estimations du potentiel des eaux souterraines, sont présentés dans le présent paragraphe, et les résultats des analyses prévisionnelles basées sur le PD sont présentés au Chapitre 9.

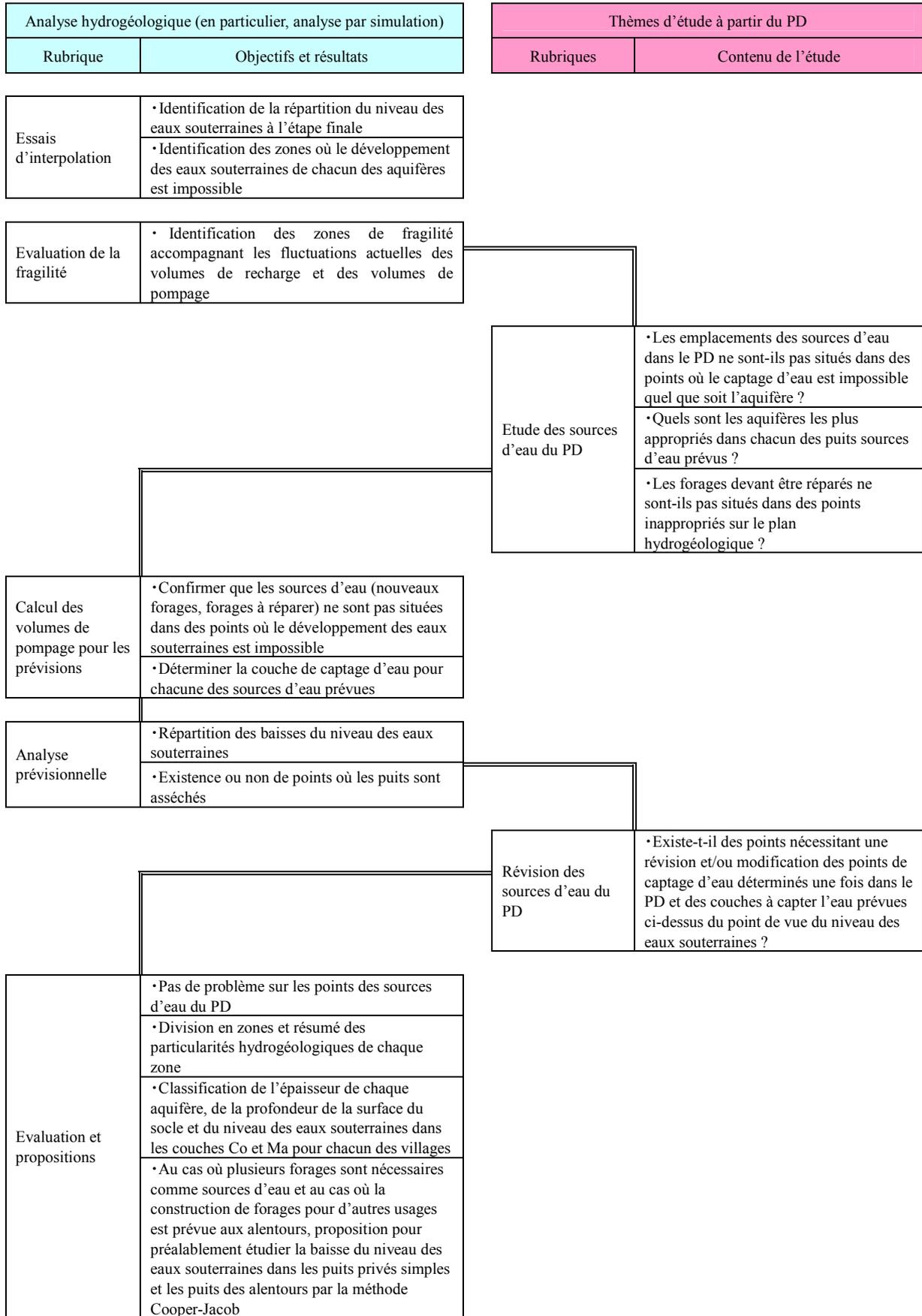


Figure 3-4-9 Procédé d'étude de la pertinence des sources d'eau du PD selon l'analyse par simulation

(3) Code utilisé

Le code MODFLOW a été utilisé pour l'analyse de simulation de l'écoulement des eaux souterraines. Le code MODFLOW est un modèle d'analyse largement utilisé dans le monde et de nombreux logiciels de sortie et de saisie ont été développés. Dans le présent projet, le logiciel intégral "Processing Modflow Pro" a été appliqué pour l'analyse.

MODFLOW est un code d'analyse de l'écoulement tridimensionnel des eaux souterraines mis au point par un laboratoire de recherche géologique des Etats-Unis, dans lequel l'écoulement tridimensionnel des eaux souterraines obtenu par une équation différentielle partielle est résolu selon le calcul des différences.

(4) Données utilisées

Les rubriques nécessaires à la construction du modèle des eaux souterraines ainsi que les données utilisées par le présent projet sont indiquées dans le Tableau 3-4-7.

Tableau 3-4-7 Données utilisées pour le modèle des eaux souterraines

Rubriques	Données d'application
Structures hydrogéologiques	Les profils stratigraphiques des forages élaborés sur la base des relevés d'excavation conservés par la DHR et la DGPRE ont été classifiés (Voir Document en annexe 1) et une analyse des structures hydrogéologiques a été effectuée en utilisant les rapports géologiques et de prospection géophysique existants. En outre, le modèle a été révisé en fonction des résultats de la prospection géophysique et des forages d'essai.
Constantes hydrogéologiques	La répartition des coefficients des volumes transmissibles (coefficient de transmissibilité) a été estimée sur la base des relevés d'excavation conservés par la DHR et la DGPRE. Pour les valeurs initiales du coefficient d'emmagasinement, de la porosité effective et du volume de suintement, une valeur normale estimée à partir du faciès de l'aquifère a été utilisée.
Volume de recharge des eaux souterraines	Un modèle de réservoir de type zone sèche (de type non humide) a été réalisé et les volumes de recharge des eaux souterraines pendant 20 ans, de 1988 à 2007, ont été estimés. Les données utilisées pour le modèle de réservoir sont les suivantes. (Voir le paragraphe 3.4.2)
Météorologie (précipitations et températures)	Les données d'observation de la Météorologie Nationale sur 20 ans de 1988 à 2007 ont été utilisées.
Données de vérification	Les données de mesure du débit des cours d'eau de la DGPRE ont été utilisées comme données de vérification.
Volumes de pompage des eaux souterraines	Les volumes de pompage des eaux souterraines ont été estimés sur la base de l'état de fonctionnement des ouvrages hydrauliques existants et sur les données statistiques de la population de 2002. (Voir le paragraphe 3.4.3)
Hauteur d'eau initiale	Un calcul d'instabilité à long terme (calcul de semi-stabilité) a été effectué avant la période de vérification (de janvier 1988 à décembre 2007) et ces valeurs ont été utilisées pour la hauteur d'eau initiale au moment du début du calcul d'instabilité de la vérification.
Conditions limites	Les conditions limites ont été déterminées sur la base des résultats des observations du débit des cours d'eau ainsi que sur les résultats des observations du niveau des eaux souterraines à proximité des cours d'eau.
Données de vérification du modèle	Les données d'observation des eaux souterraines de la DGPRE ont été utilisées comme données de vérification.

(5) Structure du Modèle

Le modèle 3D de grande étendue, qui concerne la totalité des zones de roches sédimentaires dans la région de l'étude, a été réalisé afin d'analyser l'écoulement tridimensionnel des eaux souterraines sur une grande étendue. Le quadrillage plane du modèle 3D de grande étendue a été déterminé afin de couvrir l'ensemble de la zone de roches sédimentaires de la région de l'étude, comme le montre la Figure 3-4-10. Le quadrillage modèle a pris pour critères la bande 28 du système de coordonnées UTM de WGS84 de mesures terrestres, et les dimensions planes de chaque quadrillage sont de 1 km x 1 km.

La structure en coupe du modèle 3D de grande étendue permet de couvrir en relief l'ensemble de la cuvette des eaux souterraines à l'intérieur de la région de Tambacounda et de Matam en direction de la

profondeur.

La classification hydrologique et chronostratigraphique du Sénégal est telle qu'indiquée dans le tableau ci-dessous et un modèle reflétant les conditions hydrogéologiques jusqu'à la base de la cuvette des eaux souterraines (fond de l'aquifère du Maastrichtien) sera élaboré. Une division en 5 strates d'aquifère est possible comme indiqué ci-dessous, et un modèle ayant une structure à six strates, incluant les roches du socle englobant ces 5 strates, sera adopté.

- Aquifères du quaternaire
- Aquifères du continental terminal, oligocène miocène
- Aquifères de l'éocène
- Aquifères du paléocène
- Aquifères du Maastrichtien
- Roches du socle

D'autre part, il sera nécessaire de déterminer les conditions limites en tenant compte des conditions hydrogéologiques dans le modèle de simulation. Les limites de clôture et les limites de hauteur d'eau ordinaire ont été déterminées dans le présent projet et les détails sont donnés dans le Rapport de soutien (paragraphe 6.3.1).

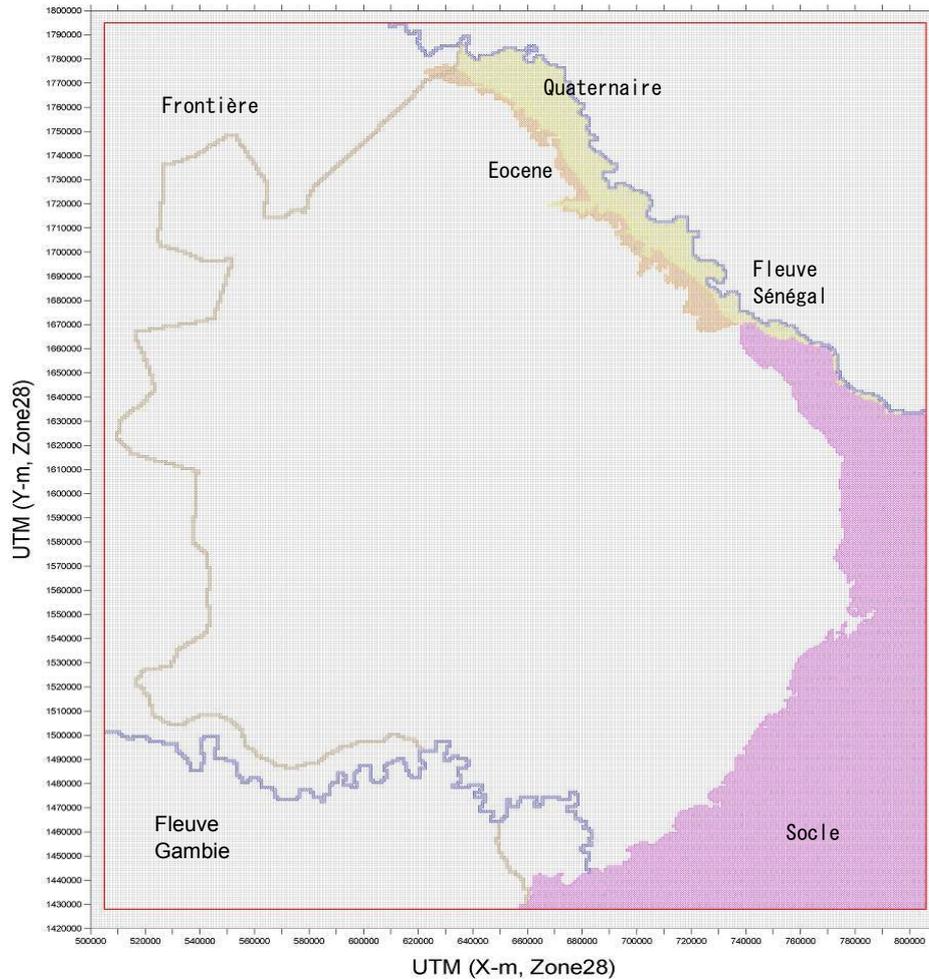


Figure 3-4-10 Envergure de l'analyse par le modelé

(6) Résultats des essais d'interpolation

1) Hauteur d'eau initiale

La vérification du modèle 3D de grande étendue a été effectuée par calcul irrégulier en saisissant des données mensuelles et temporaires allant de janvier 1988 à décembre 2007. Un calcul irrégulier à long terme (calcul semi-régulier) a été effectué avant le calcul irrégulier de la période de vérification et il a été considéré comme hauteur d'eau initiale au moment du début du calcul irrégulier pour la vérification (Voir page suivante).

La méthode de calcul irrégulier à long terme (calcul semi-régulier) utilisée lors de la présente étude est telle qu'indiquée ci-dessous.

- a) Détermination de la répartition des niveaux des eaux souterraines sur la base du niveau d'eau statique au moment des excavations pour chaque aquifère
- b) Réalisation de calcul de 10 cycles (50 ans) avec les conditions pour cinq années entre 1989 et 1992
- c) Saisie de la hauteur d'eau calculée à l'étape finale de b), considérée comme la hauteur d'eau initiale du calcul irrégulier pour la vérification

2) Comparaison entre les variations de la hauteur d'eau calculée et les variations de la hauteur d'eau mesurée

La hauteur d'eau initiale mentionnée dans le paragraphe précédent a été saisie dans chaque couche

modèle, les données des volumes de recharge et des volumes des eaux souterraines par mois, durant 240 mois entre janvier 1988 et décembre 2007 ont été également introduites et un calcul de vérification a été effectué. La vérification de la précision des modèles a été réalisée en comparant les variations des niveaux d'eau observés avec les variations des hauteurs d'eau calculées dans les forages d'observation de la DGPRE.

Les détails sur les résultats de la vérification sont indiqués dans le Rapport de soutien (paragraphe 6.3.2).

3) Interaction des eaux du fleuve Sénégal et des eaux souterraines dans le calcul d'instabilité de vérification

Dans le bassin du fleuve Sénégal, une interaction se produit entre les eaux du cours d'eau et les eaux souterraines en raison des relations des niveaux du cours d'eau et des eaux souterraines (Lorsque le niveau du cours d'eau est plus élevé que celui des eaux souterraines : recharge du cours d'eau vers les eaux souterraines et lorsque le niveau du cours d'eau est plus bas que celui des eaux souterraines : écoulement des eaux souterraines vers le cours d'eau).

D'autre part, les résultats du calcul de l'interaction entre les eaux du fleuve Sénégal et les eaux souterraines durant la période de vérification sont indiqués dans la figure ci-dessous (la couleur rouge correspond aux volumes de pénétration du fleuve dans les eaux souterraines et la couleur bleu aux volumes de sortie des eaux souterraines vers le fleuve.). L'interaction entre les deux types d'eau se fait comme indiqué ci-dessous.

- Dans la couche du Quaternaire et la couche du Maastrichtien, les eaux du fleuve Sénégal pénètrent dans les eaux souterraines durant la saison des pluies (en particulier à la fin de cette saison) et les eaux souterraines s'écoulent dans le fleuve Sénégal pendant la saison sèche.
- Avec la moyenne sur 20 ans, les volumes de sortie de la couche du Quaternaire vers les eaux du fleuve sont estimés à 30 000 000 m³/an environ, la pénétration des eaux du fleuve dans la couche du Maastrichtien étant estimée à 13 500 000 m³/an environ.
- Dans la couche du Quaternaire, des écoulements des eaux souterraines maximum de 52 000 000 m³/an (2004) et minimum de 6 750 000 m³/an (1994) ont été estimés.
- Dans la couche du Maastrichtien, des écoulements des eaux souterraines de 30 000 000 m³/an ont été estimés pour l'année 2004, d'une part, et une pénétration de 100 millions m³/an vers les eaux souterraines a été estimée pour l'année 1994 d'autre part.

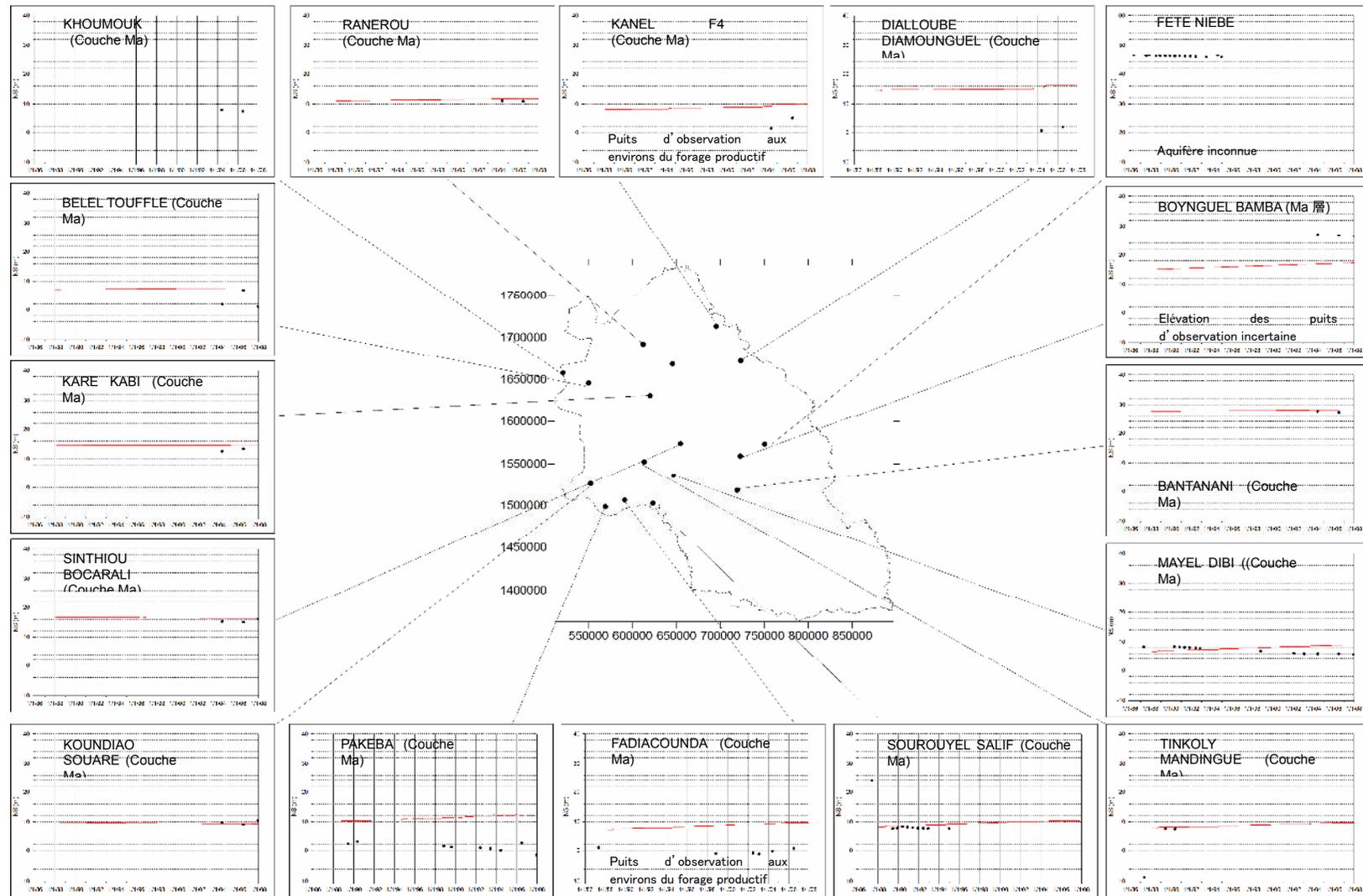


Figure 3-4-11 Comparaison entre les fluctuations du niveau des eaux souterraines observés (points noirs) et les fluctuations de la hauteur calculée des eaux souterraines (lignes rouges) dans les forages d'observation de la DGPRES

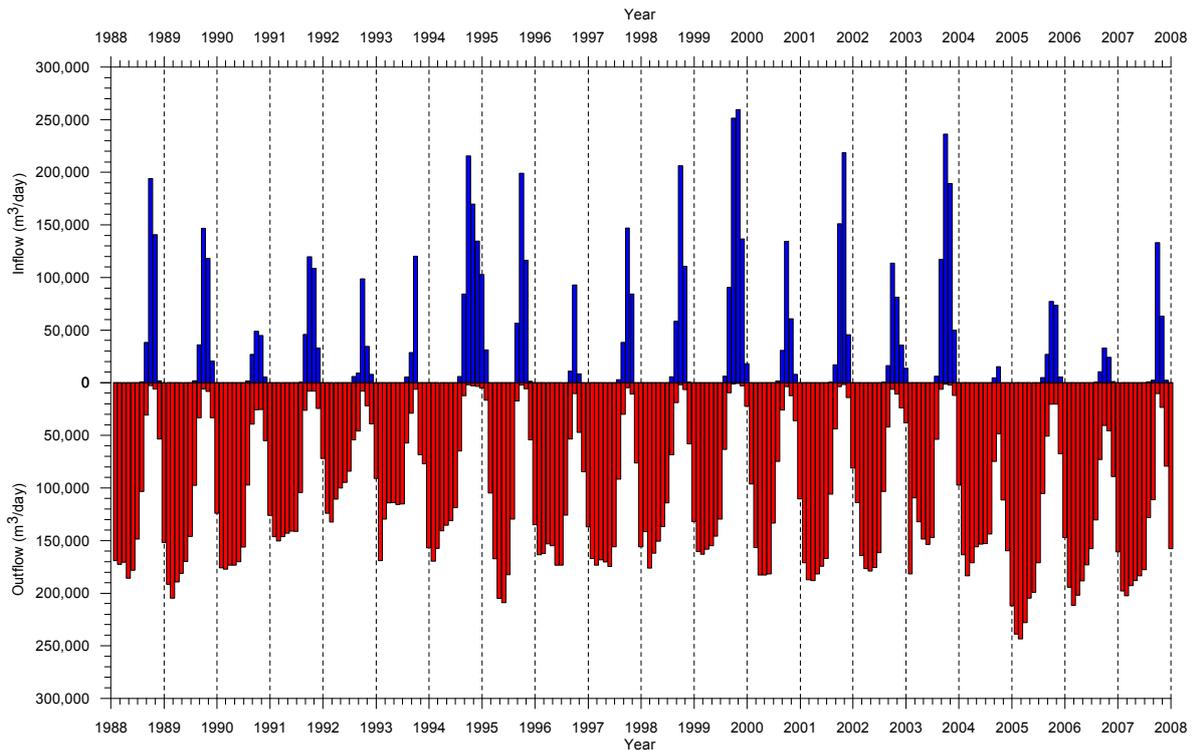


Figure 3-4-12 Ecoulements des eaux du fleuve Sénégal et des eaux souterraines (Quaternaire)

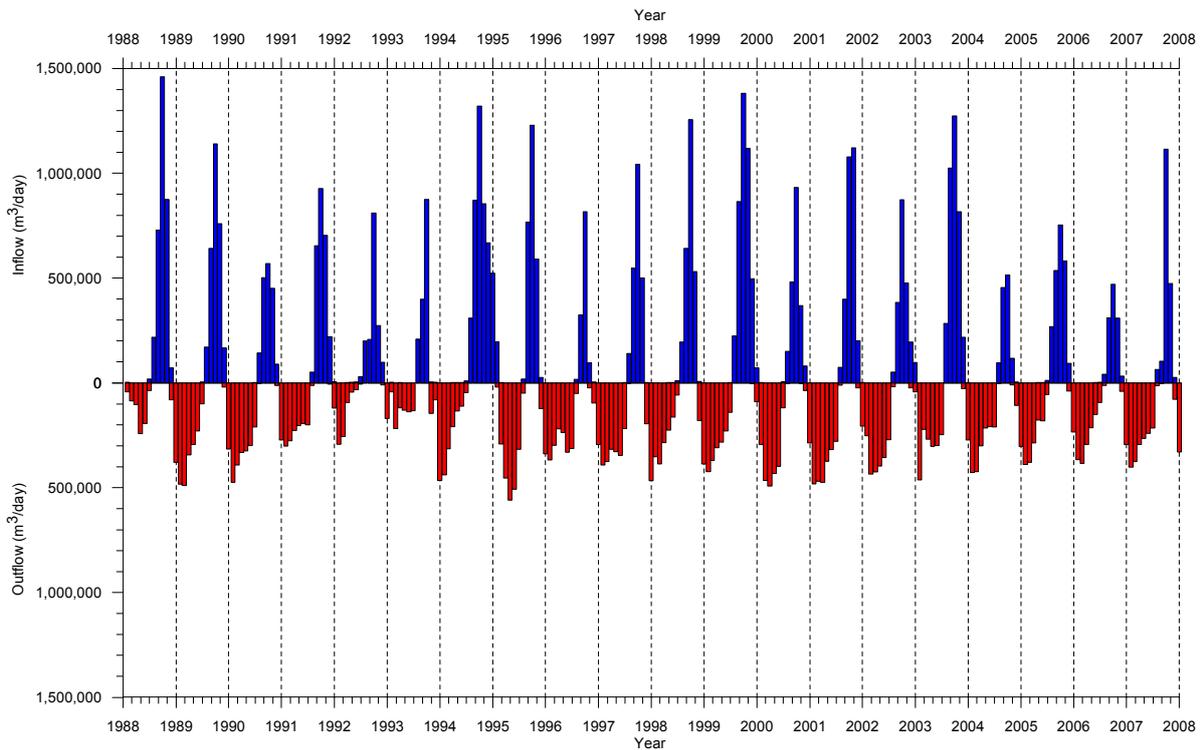


Figure 3-4-13 Ecoulements des eaux du fleuve Sénégal et des eaux souterraines (Maastrichtien)

(7) Analyse de fragilité

Les deux scénarios suivants ont été élaborés afin d'évaluer la fragilité hydrogéologique de la région de l'étude et les différences concernant les baisses de hauteurs d'eau calculées ont été mises à l'étude.

- 1) Fluctuations des volumes de recharge
- 2) Fluctuations des volumes d'exhaure

Par ailleurs, ces résultats a servi de base de documentation pour l'étude des aquifères déterminés pour chacune des installations d'alimentation en eau, pour les calculs de prévisions conformément au Plan directeur, indiqués au paragraphe suivant.

Les détails des résultats de l'analyse de fragilité sont présentés dans le Rapport de soutien (paragraphe 6.3.3).

1) Fluctuations du volume de recharge

Comme indiqué dans le Tableau 3-4-8, nous avons considéré un scénario postulant la prévalence d'une sécheresse et les différences de hauteur d'eau entre le modèle de base et le modèle prenant comme postulat la prévalence de la sécheresse a été déterminée. Ces différences de hauteur de l'un et l'autre modèle, en décembre de la dixième année qui constitue la dernière étape, sont indiquées à titre d'exemples dans le Tableau 3-4-14.

Dans la couche Co, la zone indiquée en gris présente une couche peu profonde ne convenant pas pour l'exhaure d'eau et une baisse du niveau d'eau de 5 cm environ au maximum apparaît du côté ouest jouxtant cette zone ainsi que sur une vaste étendue. Par ailleurs, dans le sud de la région de Tambacounda également, des baisses du niveau des eaux souterraines apparaissent partiellement mais avec la sécheresse envisagée par ce scénario, cela n'influe pas l'exploitation de la couche Co avec les ouvrages hydrauliques existants. Une baisse de niveau d'eau de 34 cm environ au maximum est prévue le long du fleuve Gambie mais cette région n'utilise pas la couche Co pour le captage d'eau.

Dans la couche Ma, des baisses du niveau des eaux souterraines se produisent aux alentours de la limite avec les roches du socle, dans le sud-est de la région de Matam et le sud de la région de Tambacounda. S'il existe, dans la partie sud-est de la région de Matam, des ouvrages hydrauliques dans la région où une baisse du niveau des eaux souterraines se produit, cette baisse est au maximum de 10 cm environ, et elle n'a pratiquement aucune influence sur les installations. En outre, une baisse du niveau d'eau de 52 cm environ au maximum est prévue aux alentours de la limite avec les roches du socle mais il n'y a ni ouvrages hydrauliques, ni village dans cette partie du pays.

Tableau 3-4-8 Scénario postulant la prévalence d'une sécheresse

Année	Modèle de base			Modèle basé sur la prévalence d'une sécheresse		
	Volume de recharge	Volume de pompage	Hauteur d'eau	Volume de recharge	Volume de pompage	Hauteur d'eau
Démarrage	31 décembre 2007					
1 ^{ère} année	1989	2007	1989	1989	2007	1989
2 ^e année	1989	2007	1989	1989×0,75	2007	2006
3 ^e année	1989	2007	1989	1989×0,75	2007	2006
4 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007	1989
5 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007	1989
6 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007	1989
7 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007	1989
8 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007	1989
9 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007	1989
10 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007	1989

2) Fluctuations des volumes de pompage

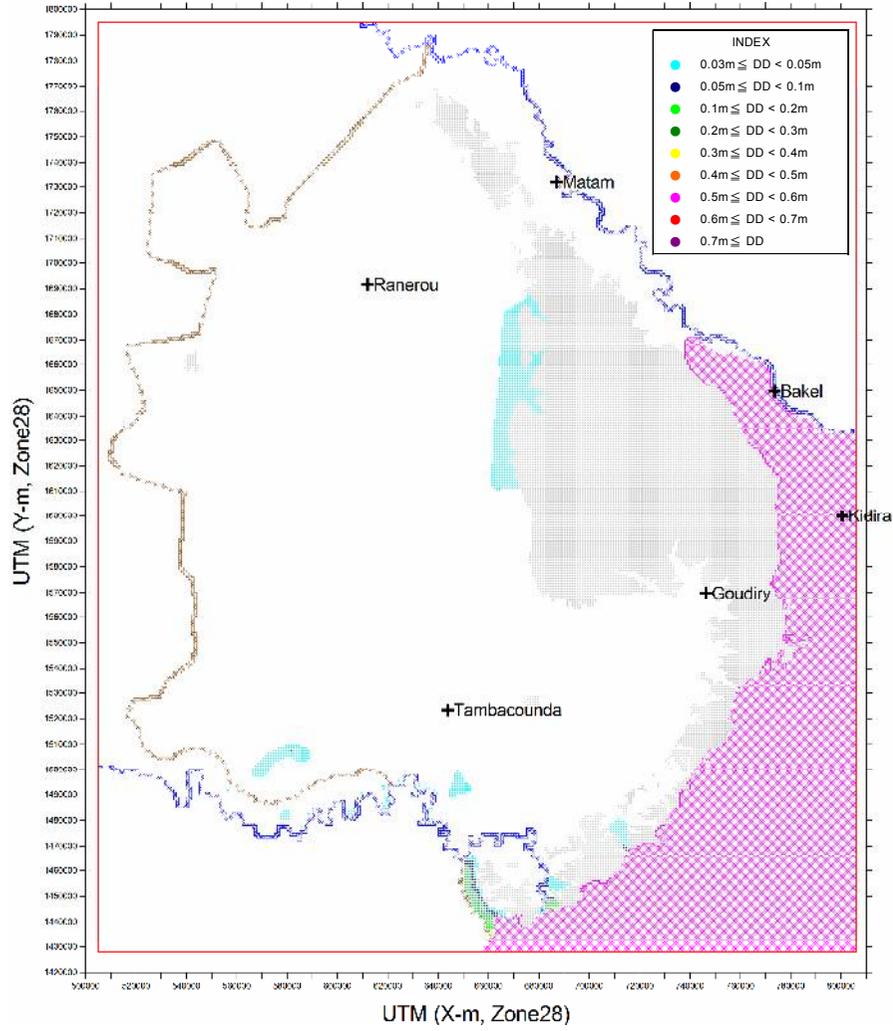
Comme indiqué dans le Tableau 3-4-9, un scénario postulant la prévalence d'une sécheresse a été établi et les différences de hauteur d'eau entre le modèle de base et le modèle postulant la sécheresse a été recherchée, comme pour les fluctuations du volume de recharge. Ces différences de hauteur de l'un et l'autre modèle, en décembre de la quinzième année qui constitue la dernière étape, sont indiquées en tant qu'exemples dans le Tableau 3-4-15.

Dans la couche Co, aux alentours des ouvrages hydrauliques existants dans la partie sud de Tambacounda, une baisse de niveau de 44 cm environ au maximum se produit. Par ailleurs, dans la couche Ma, au sud-est de la région de Matam, une baisse du niveau d'eau de 60 cm environ au maximum a été remarquée.

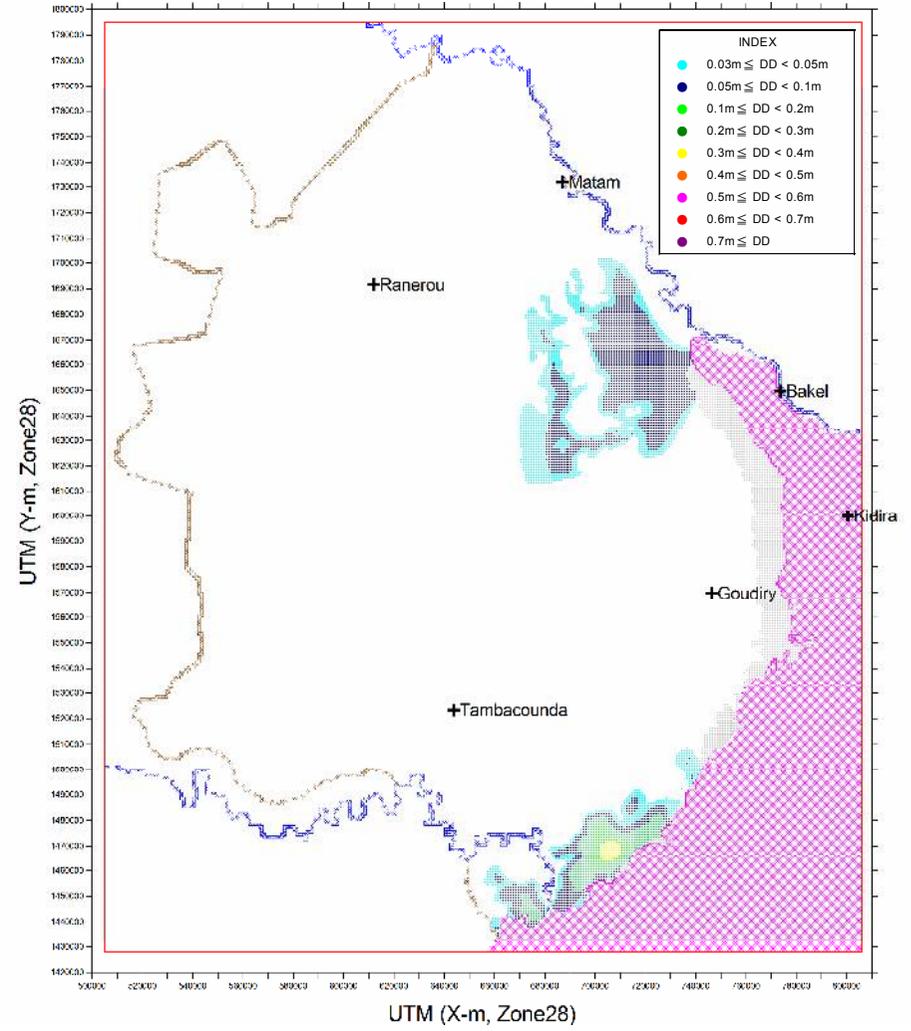
Le niveau d'eau d'inondation des forages existants est relativement profond et l'on peut considérer qu'il n'y aura pratiquement aucune influence sur les ouvrages hydrauliques. Toutefois, si des forages sont construits à proximité, la baisse du niveau d'eau risque d'augmenter en raison d'une ingérence mutuelle et il sera par conséquent nécessaire de prendre dûment en considération la distance entre les installations. En outre, pour les forages peu productifs, étant donné que la baisse de leur niveau d'eau augmente parallèlement à l'augmentation des volumes de pompage (augmentation des pertes des forages), il sera nécessaire d'élaborer un plan de prise d'eau afin d'éviter l'apparition de baisses excessives du niveau d'eau.

Tableau 3-4-9 Scénario postulant l'augmentation du volume de pompage

Année	Modèle de base			Modèle basé sur l'augmentation du volume de pompage		
	Volume de recharge	Volume de pompage	Hauteur d'eau	Volume de recharge	Volume de pompage	Hauteur d'eau
Démarrage	31 décembre 2007					
1 ^{ère} année	1989	2007	1989	1989	2007×1,067	1989
2 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,129	1989
3 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,188	1989
4 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,242	1989
5 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,293	1989
6 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,340	1989
7 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,384	1989
8 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,426	1989
9 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,464	1989
10 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,500	1989
11 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,500	1989
12 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,500	1989
13 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,500	1989
14 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,500	1989
15 ^e année	1989	2007	1989	1989	2007×1,500	1989

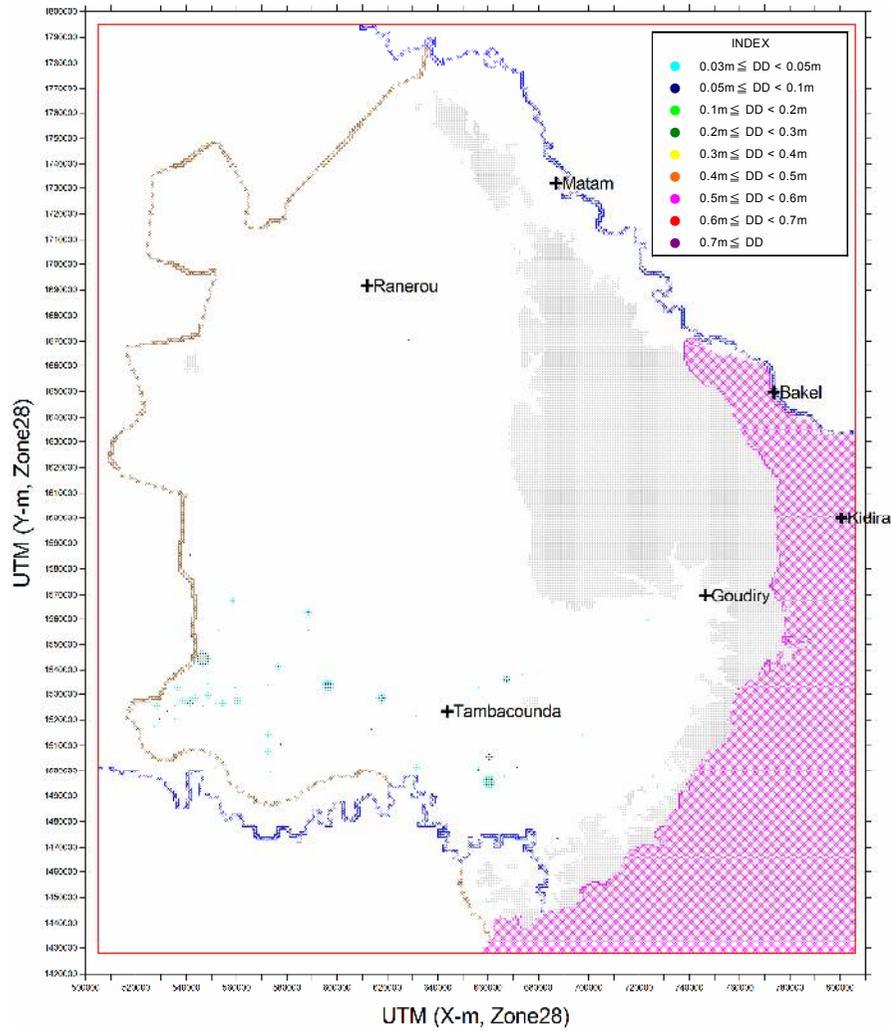


(10^e année, décembre, Couche Co)

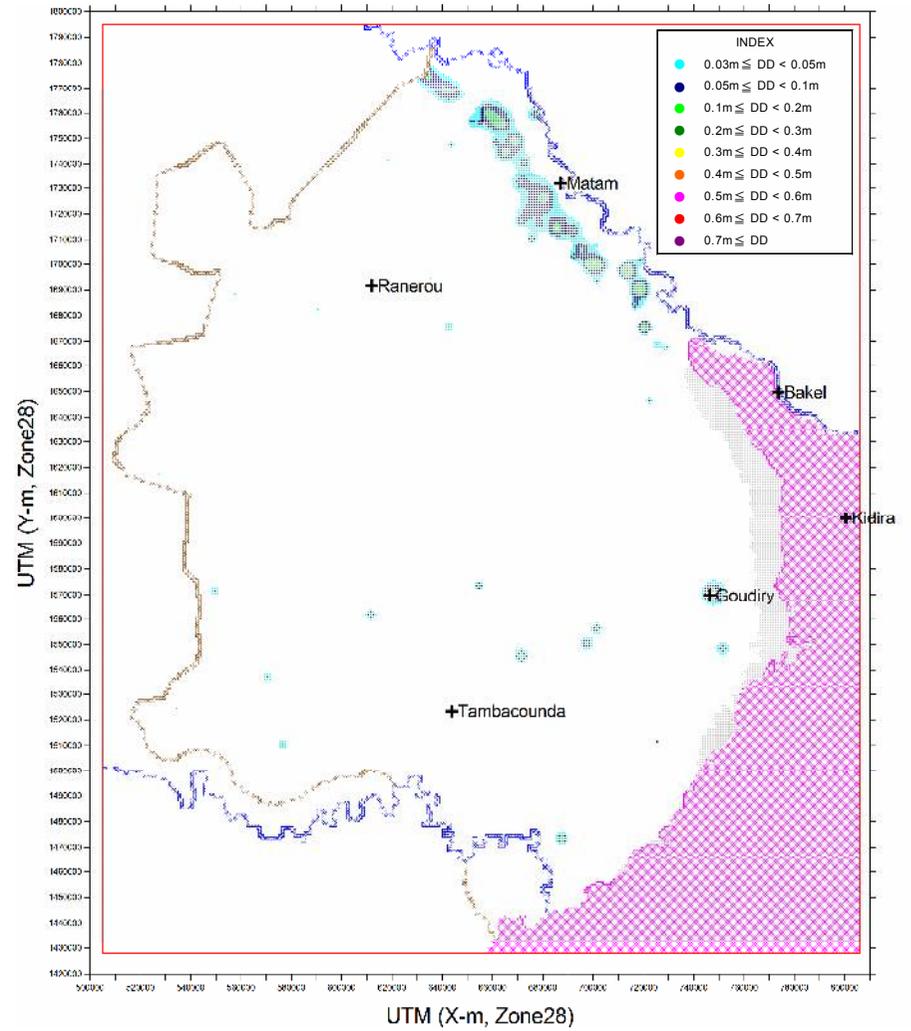


(10^e année, décembre, Couche Ma)

Figure 3-4-14 Fluctuations des volumes de recharge et exemple de répartition des différences de hauteur d'eau calculées



(15^e année, décembre, Couche Co)



(15^e année, décembre, Couche Ma)

Figure 3-4-15 Fluctuations des volumes de recharge et exemple de répartition des différences de hauteur d'eau calculées

3.4.5 Evaluation du potentiel des ressources en eau dans les zones de roches sédimentaires

(1) Zonage, caractéristiques hydrogéologiques et capacités d'Aquifère

A partir des caractéristiques hydrogéologiques, notamment, les structures hydrogéologiques, les niveaux des eaux souterraines et le degré de fragilité, entre autres, la division de la zone de roches sédimentaires se fera dans le projet en considérant les caractéristiques hydrogéologiques et les capacités d'Aquifère. Cela est indiqué dans la Figure 3-4-16.

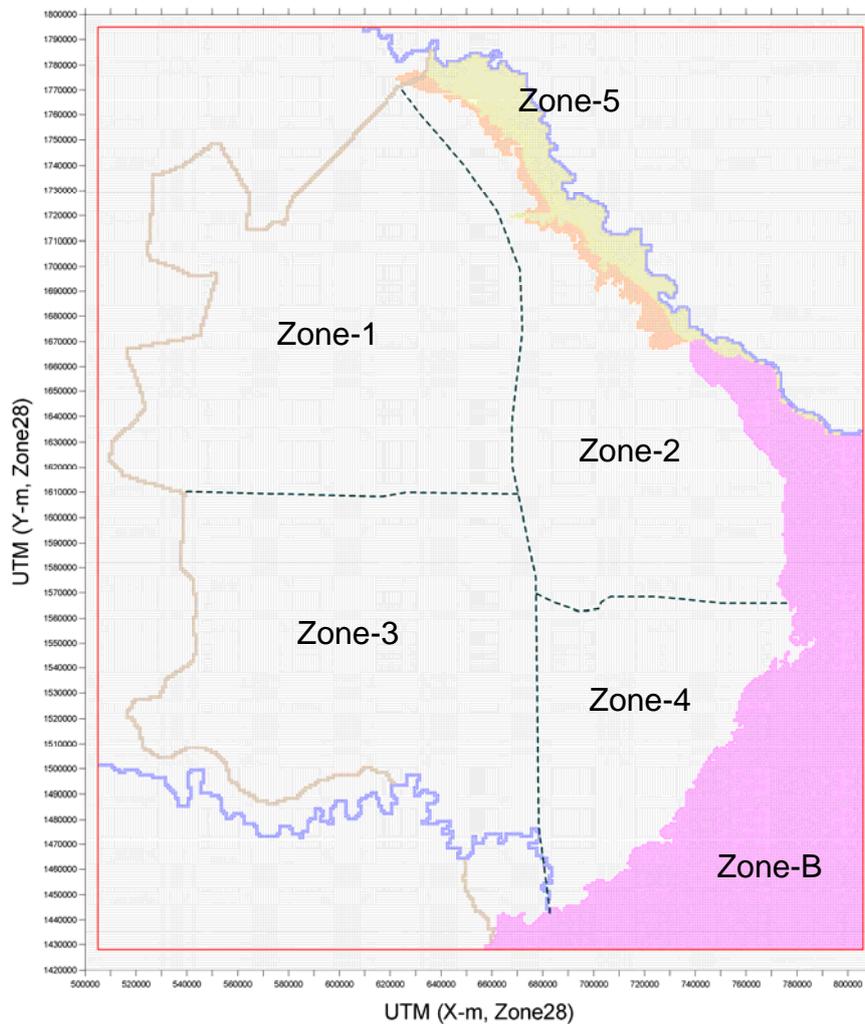


Figure 3-4-16 Division de la zone des roches sédimentaires

Les caractéristiques hydrogéologiques et les capacités d'Aquifère de chacune des régions sont résumées dans le tableau ci-dessous. Les caractéristiques hydrogéologiques de chacun des villages situés dans la zone des roches sédimentaires sont résumées sous forme de liste et indiquées dans le Livre des données.

Tableau 3-4-10 Division en zone et caractéristiques hydrogéologiques

	Zone-1	Zone-2	Zone-3	Zone-4	Zone-5
Quaternaire (Sédiments des cours d'eau)	—	—	—	—	Fluctuations des niveaux des eaux souterraines relativement importantes en raison de la réception d'une recharge par le fleuve Sénégal pendant la saison des pluies. Importance de l'identification des fluctuations des épaisseurs et des faciès.
Continental terminal (y compris une partie de sédiments du Quaternaire)	Existence de zones où la prise d'eau est possible. Ne convient pas toutefois à un développement de grande envergure car très influencée par les volumes de recharge et les volumes d'exhaure.	Peu d'épaisseur des strates et grandes possibilités de puits secs. Possibilité de développement partiel des eaux souterraines de forme lenticulaire.	Présente le potentiel le plus élevé en tant que strate du CT.	Existence de zone où la prise d'eau est possible dans les vallées de la base. Toutefois, les zones possibles sont limitées par rapport à la Zone 3.	—
Eocène	Existence d'eaux souterraines dans certains endroits selon les faciès. Toutefois, possibilités élevées de ne pas obtenir de prise d'eau stable.	Peu d'épaisseur des strates et grandes possibilités de puits secs. Possibilité de développement partiel des eaux souterraines de forme lenticulaire.	Prise d'eau possible dans les parties du faciès présentant une grande perméabilité et les sites de collecte des eaux souterraines.	Prise d'eau possible dans les parties du faciès présentant une grande perméabilité et les sites de collecte des eaux souterraines. Toutefois, limitée par rapport à la Zone 3.	—
Paléocène	Existence d'eaux souterraines dans certains endroits selon les faciès. Toutefois, possibilités élevées de ne pas obtenir de prise d'eau stable.	Existence d'eaux souterraines mais possibilités élevées de ne pas obtenir de prise d'eau stable.	Prise d'eau possible dans les parties du faciès présentant une grande perméabilité et les sites de collecte des eaux souterraines.	Prise d'eau possible dans les parties du faciès présentant une grande perméabilité et les sites de collecte des eaux souterraines. Toutefois, limitée par rapport à la Zone 3.	—
Maastrichtien	Principale aquifère mais capacités inférieures par rapport à la Zone 3. Toutefois les forages sont moins profonds que ceux de la Zone 3.	Très influencée par les fluctuations des volumes de recharge et des volumes d'exhaure par rapport aux autres zones.	Présente le potentiel le plus élevé. Toutefois, la profondeur d'exploitation augmente.	Influencée par les fluctuations des volumes de recharge et des volumes d'exhaure à proximité des roches du socle et nécessité de confirmer si l'épaisseur de la strate est suffisante.	Plus grande épaisseur en direction de l'aval. Petite épaisseur de la strate à proximité de Kidira-Bakel et pas de possibilité de strate de prise d'eau.

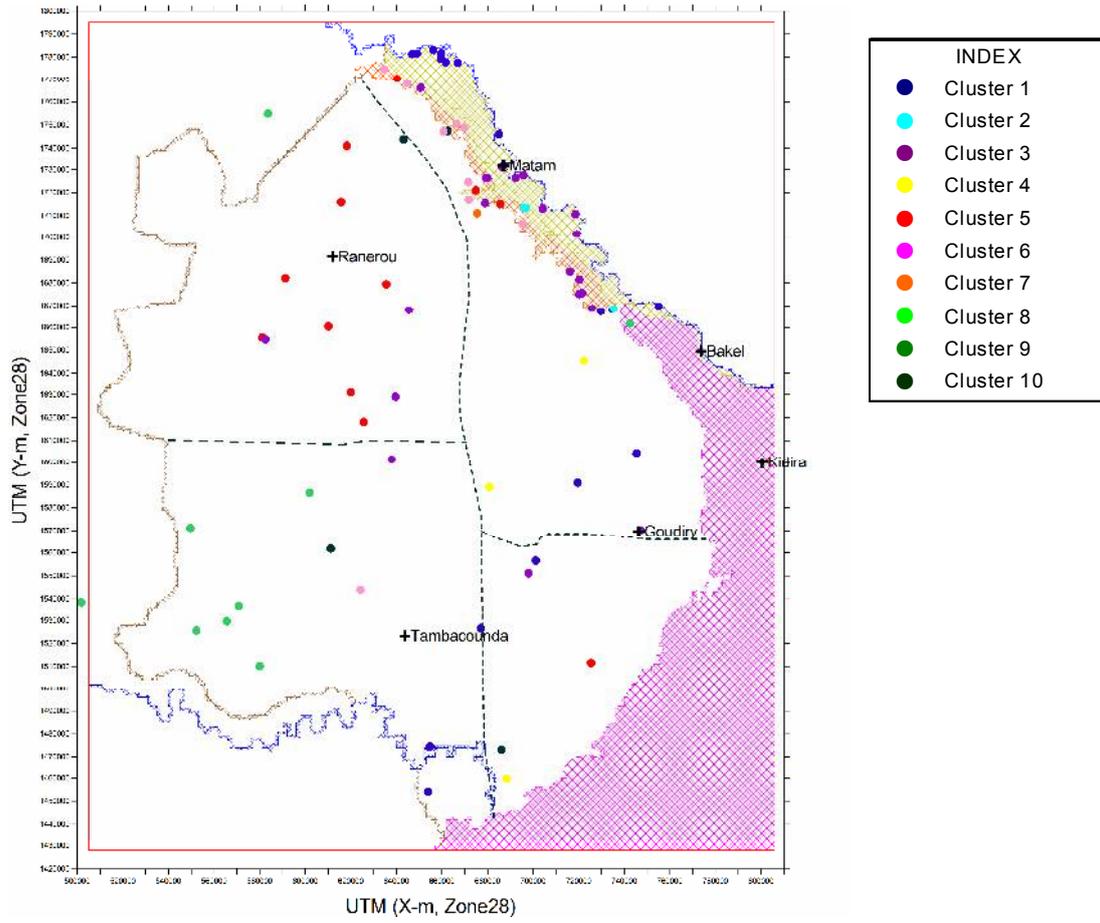


Figure 3-4-18 Résultats de l'analyse d'ensemble des principaux ions des eaux souterraines (répartition plane)

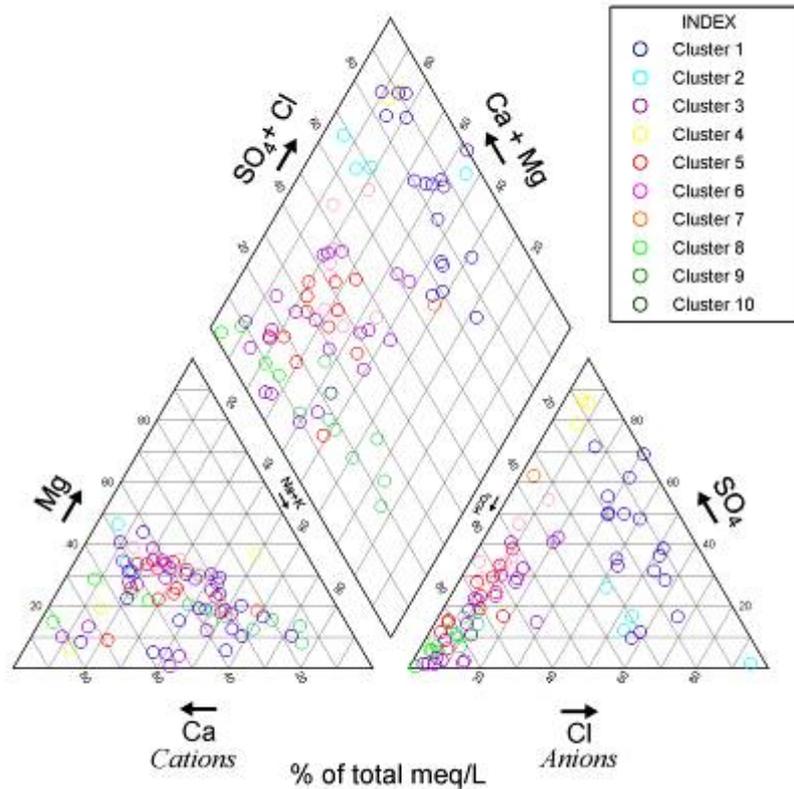


Figure 3-4-19 Diagramme tri-linéaire

3.4.6 Evaluation du potentiel des ressources en eau dans les zones de roches du socle

(1) Couche sédimentaire répartie dans la zone de roches du socle

Dans la région du présent projet, les roches du socle sont principalement réparties dans la région de Kédougou, alors que la couche sédimentaire (couche Q) se trouve le long des cours d'eau relativement importants, comme les affluents du fleuve Gambie. (Figure 3-4-20 En vert : zone des roches du socle ; en jaune : zone de la couche Q (y compris la zone de la couche de limons)). La zone où cette couche Q est répartie en profondeur présente les mêmes caractéristiques hydrogéologiques que celles de la zone 5 de la région de la couche sédimentaire, et elle constitue un excellent aquifère dans la zone où la couche présente une bonne épaisseur. Toutefois, elle subit l'influence des variations des volumes de recharge à partir des cours d'eau et elle se caractérise par le fait que les fluctuations des niveaux des eaux souterraines sont relativement importantes. Une étude des variations de l'épaisseur de la couche, ainsi que des variations du faciès seront nécessaires lors du développement des eaux souterraines.

Tableau 3-4-11 Catégorisation des roches du socle et potentiel du développement des eaux souterraines

Géologie des strates de surface	Potentiel des eaux souterraines	
	Elevé	Possible
Roches sédimentaires du Cambrien	<ul style="list-style-type: none"> • Répartition de basaltes grossiers accompagnant les failles et les failles (zone broyée) • Zone de concentration de broyage dans les zones des roches de boue. • (Zone de répartition de veines de quartz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures • Zone de répartition de veines de quartz • Les roches métamorphiques sous la strate aux environs de Kidira-Bakel constituent la principale aquifère
Roches volcaniques du Cambrien (andésites)		<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures
Roches métamorphiques du Cambrien (schistes et quartzites)	<ul style="list-style-type: none"> • Répartition de basaltes grossiers accompagnant les failles et les fissures • (Zone de répartition de veines de quartz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures • Zone de répartition de veines de quartz
Basaltes grossiers	<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures 	<ul style="list-style-type: none"> • Zone de petites fissures
Birimien (schistes, quartzites, grauwaacke, conglomérat)	<ul style="list-style-type: none"> • Répartition de basaltes grossiers accompagnant les failles et les fissures • (Zone de répartition de veines de quartz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures • Zone de répartition de veines de quartz
Cipolins (calcaires cristallins)		<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures
Basaltes	<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures 	<ul style="list-style-type: none"> • Zone de petites fissures
Andésites		<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures
Amphibolites		<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures
Granits (excepté ceux ci-dessous)		<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures • Zone de répartition de veines de quartz • Zone de répartition de veines de pegmatites
Granits (activités magmatiques au moment de l'orogénèse)	<ul style="list-style-type: none"> • Erosion des couches profondes dans les zones de granits grossiers • Répartition de roches intrusives dans les zones de granits grossiers • Zone d'intrusion de roches basiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Zone de failles et de fissures • Zone de répartition de veines de quartz • Zone de répartition de veines de pegmatites

Tableau6-2-8 Sites des équipements de pompage à réhabiliter
sous la tutelle de la BPF de Kédougou

VILLAGE_PR	Année de réhabilitation	pop RGPH 2002	Pop 2015	Communauté rurale	Coût direct des travaux de cas antérieurs	Coût direct des travaux par personne	Coût direct des travaux de réhabilitation d'urgence
					Million CFA	Mille CFA	Million CFA
Daloto	2012	808	1 376	MISSIRAH SIRIMANA	58	42	46
Pelel Kindissa	2012	809	1 377	BANDAFASSI	58	42	46
Niagalancome	2012	540	919	FONGOLEMBI	57	62	46
Dioulafoundou	2013	299	509	SARAYA	56	110	46
Bransan	2013	744	1267	KHOSSANTO	56	175	46
Total		3 387	5766		344	60	275

6.3 Réhabilitations à partir du projet à moyen terme

(1) Généralités

Les demandes d'agrandissement des ouvrages, comme celles mentionnées ci-dessous, sont faites même pour les AEV actuellement en fonctionnement.

- Pose de canalisations jusqu'aux villages polarisés, et installation de bornes fontaines pour réduire le travail de transport de l'eau jusqu'au village.
- Prolongation des canalisations de distribution à une zone élargie, installation de bornes fontaines, et augmentation du nombre de bornes fontaines dans la zone actuellement desservie pour réduire la distance de transport de l'eau.
- Augmentation des canalisations de distribution pour renforcer la densité du réseau de distribution car les canalisations de distribution doivent arriver jusque devant les habitations pour l'approvisionnement par branchements particuliers.
- Remplacement des équipements de pompage pour augmenter le volume d'eau pompé du forage.
- Remplacement des canalisations de distribution par des tuyaux plus gros et mise en place de canalisations de distribution de dérivation pour augmenter le volume d'eau fourni.
- Travaux d'électrification pour réduire le coût d'exploitation.

Les travaux réalisables sur budget réduit pour résoudre ces problèmes sont prévus sur le budget du PNDL, de la communauté rurale ou par l'intermédiaire d'une ONG. Par ailleurs, les ASUFOR à capacité d'exploitation élevée effectuent les branchements particuliers sur fonds propres et en gérant les travaux.

Dans ce projet, nous visons l'augmentation des ressources financières pour la réhabilitation, et proposons la mise en place d'un château d'eau et de nouvelles canalisations de distribution, ainsi que le renouvellement des équipements de pompage requis pour intégrer les mini adductions d'eau potable.

(2) Ordre de priorité pour le diagnostic de réhabilitation

En cas de travaux de réhabilitation, une liste des villages cibles sera établie sur la base des critères définis. Plusieurs dizaines d'ouvrages, à degré de priorité élevé, seront diagnostiqués pour obtenir des documents de référence pour l'exécution ou non de la réhabilitation et pour définir les types de travaux nécessaires.

Les critères seront, comme pour la mise par ordre de priorité des nouveaux ouvrages, la dimension de la profitabilité (population bénéficiaire), le degré d'urgence (degré de besoin en eau) et l'impact (possibilités de développement).

(3) Méthodes de diagnostic

Un diagnostic sera fait pour les rubriques ci-dessous et un projet de réhabilitation sera proposé.