

Chapitre 3 Etude sur les ressources en eau

3.1 Méthodologie de l'étude sur les ressources en eau

L'étude sur les ressources en eau a été menée suivant le schéma présenté dans la Figure 3-1-1. Le présent chapitre traitera du processus qui a abouti à l'évaluation du potentiel des ressources en eau à partir des résultats de la collecte et de la classification des documents existants et, en ce qui concerne la simulation ayant porté sur les eaux souterraines (analyse prévisionnelle), elle sera indiquée au Chapitre 8 "Prévisions selon les modèles tridimensionnels des eaux souterraines".

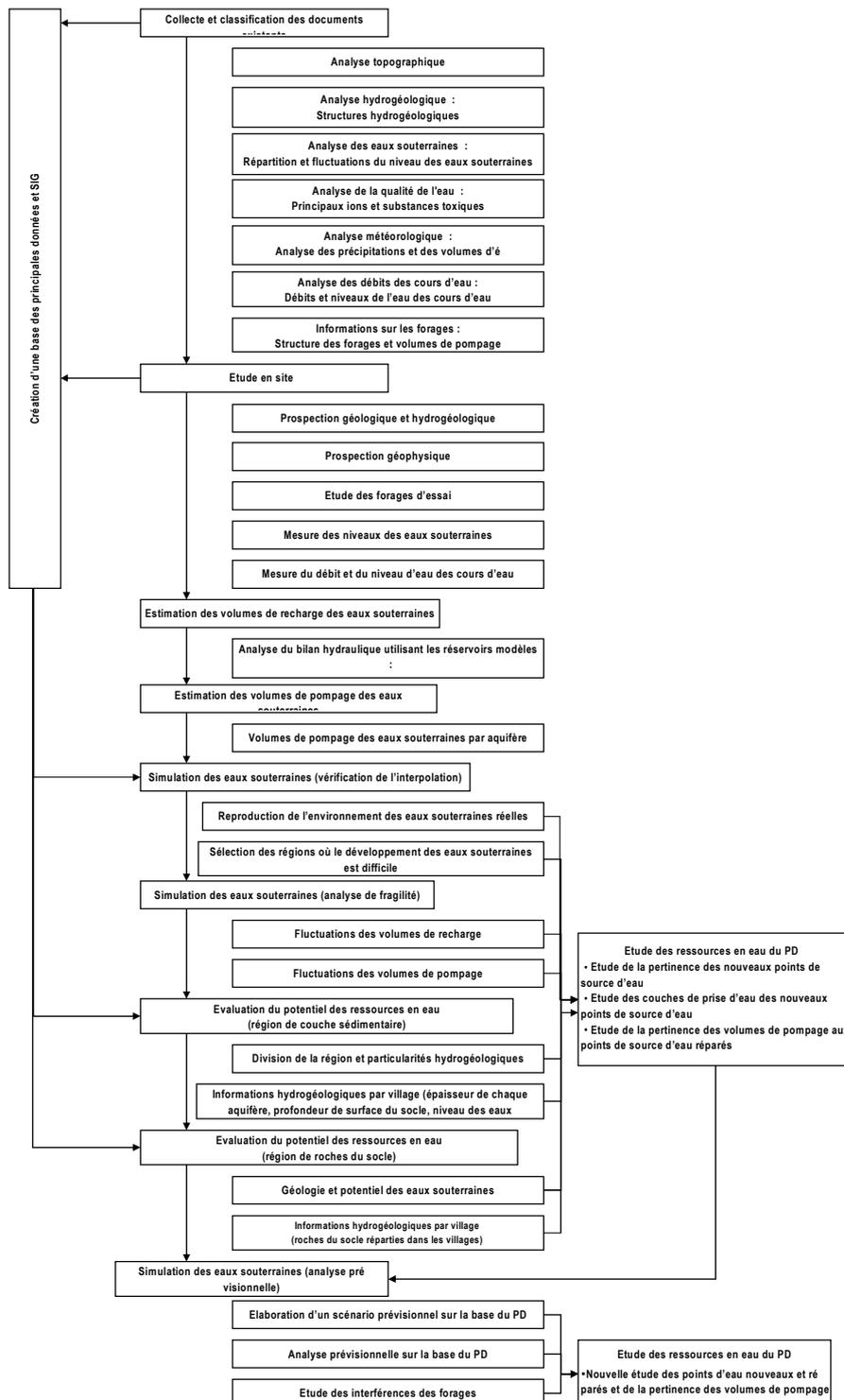


Figure 3-1-1 Schéma de l'étude sur les ressources en eau

3.2 Collecte, classification et analyse des documents existants

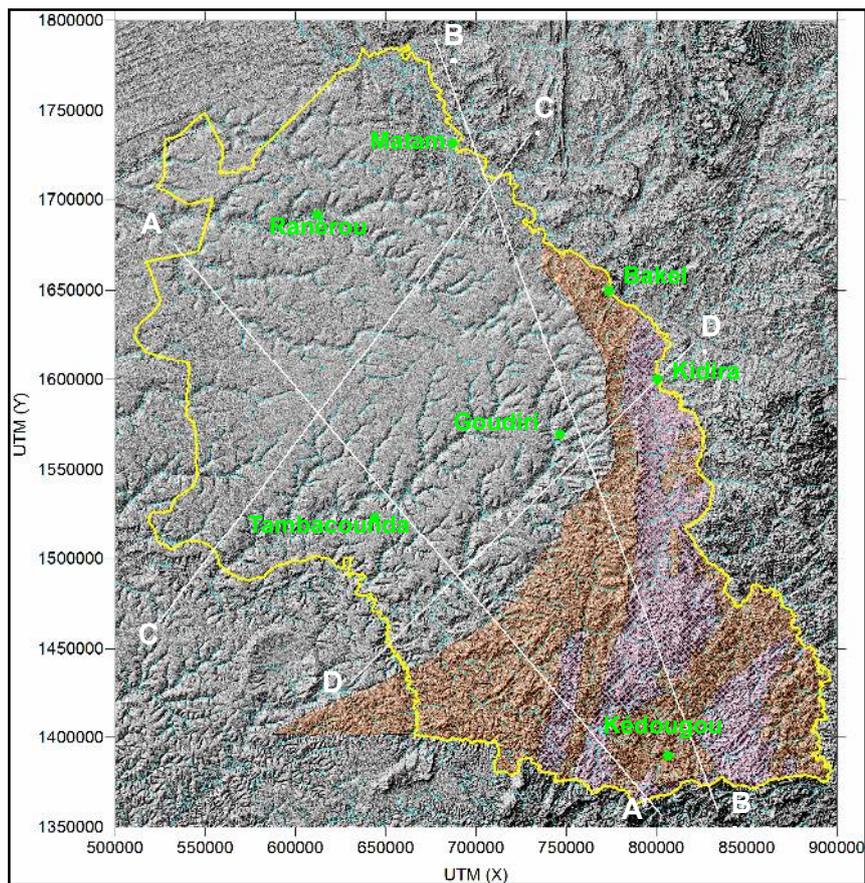
3.2.1 Documents existant collectés

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

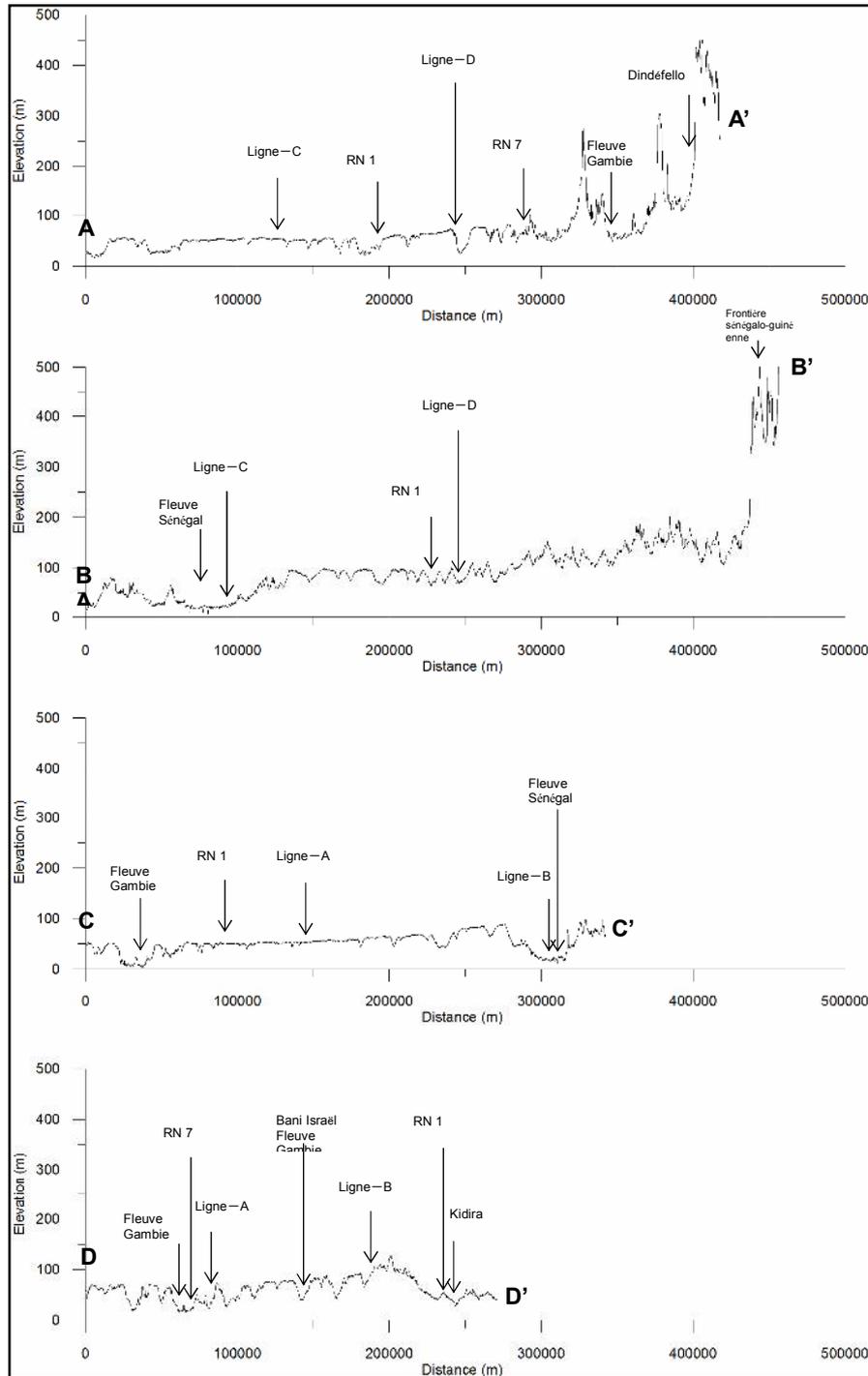
3.2.2 Analyse topographique

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.

Tableau 3-2-1 Stratigraphie hydrogéologique au Sénégal (Source : COWI (Septembre 2001))

ERE	PERIODE GEOLOGIAUE			Regroupement Strati	Zond Nord		Système Aquifère	Zond Sud		
	Syst.	Série	Etage		Lithologie dominante	Aqui..		Lithologie dominante	Aqui..	
TERTIAIRE	QUATERNAIRE			Ensemble supérieur	Sables éoliens alluvions tufs volcaniques	Aauière	"Complexe Terminal"	Sables marins et éoliens	Aauière	
	NEOGENE	PLIOCENE	"CONTINENTAL TERMINAM"		Sables coquilliers sables +/- argileux	Aquitard		Sables ou grès argileux et argiles	Aauiard	
		MIOCENE			Marno calcaire	Aquitard		Sables avec bancs d'argile et calcaires	Aauière	
		OLIGOCENE			Marnes et agiles	Aquitard				
	PALEOGENE	EOCENE	moy	LUTETIEN SUP.	Calcaires marno-calcaires	Aquiclude	"Système Aquifère du Paléogène"	Calcaires karstifiés	Aauière	
				LUTETIEN INF.	Sables	Aauière		Marno calcaires passés sable	Aauiard	
			inf	YPRESIEN	Marnes et agiles	Aquiclude		Sables calcaires coailliers ou karstifiés	Aauière	
		PALEOCENE	PALEOCENE sup. à moyen		Marno-calcaires calcaires karstifiés marnes	Aauière		Marno calcaires argiles	Aauiard	
			DANIEN		Marno calcaires	Aquitard				
	SECONDAIRE	CRETACE	CRETACES Supérieur	SENONIEN	MAASTRICHIEN	Sables grès, sables gréseux sables argileux	Aauière	"Système Maastrichtien"	Sableux avec passées d'argile	Aauière
					CAMPANIEN	Grès Sables argileux	Aauière		Sables argileux	Aauière
SENONIEN INF					Sables argileux et argiles sableuses	Aquitard	Argile sableuse		Aauiard	
TURONIEN				Argiles noires	Aquiclude	Argiles noires	Aquiclude			
CRETACES moyen			CENOMANIEN		Ensemble inférieur	Calcaires argiles sableuses	Aquiclude		Marno calcaire	Aquiclude
			ALBIEN			Calcaire, marno calcaire sables argileux			Marno-calcaires, argiles sableuses	
		APTIEN		Calcaire, marno calcaire argiles sableuses		Marno-calcaires, argiles sableuses				
CRETACES inférieur		NEOCOMIEN		Calcaire dolomitique						
JURASSIQUE			Ensemble inférieur	Calcaires, calcaires dolomitiques	Aquiclude	Calcaires et bancs de dolomie	Aquiclude			
TRIAS				Couche salifère	Aquiclude	Couche salifère	Aquiclude			
PRIMAIRE			-Socle-	Argiles siliceuses grès quarizites conglomérats	Aquiclude	Argiles siliceuses grès quarizites conglomérats	Aquiclude			
SOCLE CRISTALLIN				Granites, diorites, roches métamorphiques		Aquifère dans les zones superficielles fracturées et arénisées				

(Source : COWI, septembre 2001 ; Division de 3 couches <Aauière, Aauiard, Aquiclude> par couleur réalisée dans le cadre du Projet)

Legend

	Main Cities (town)		
	Main Roads		
	Quaternary recent alluvia		
	Quaternary clayey sediments		
	Quaternary red dunes		
	Quaternary flood banks		
	Quaternary very fine sand		
	Quaternary limistone		
	Quaternary recent laterites or iron pan		
	Quaternary lower part, very clayey soil		
	Quaternary sand		
	Quaternary sandy clay		
	Continetal Terminal		Cambrian quartzites
	Quaternary – Eocene, marl limistone		Cambrian quartz rock
	Eocene clay ans fine sand		Cambrian quartzous and sandstone
	Eocene conglomerate or sandstone		Cambrian rhyolite and delienites
	Limistone, dolomite, shade		Cambrian sandstone
	Quartz vien		Cambrian tuff
	Cambrian Andesite		Cambrian tuff and agglomerates
	Cambrian cipolins		Cambrian talus
	Cambrian diabasc		Precambrian amphibolites
	Cambrian granite		Precambrian metamophosed volcanic rock
	Cambrian schist with epidote		Precambrian metamophosed volcanic rock with basalt
	Cambrian microgranite, aplite		Precambrian pelites
	Cambrian microgranite, aplite, rhyolite		Precambrian schists
	Cambrian metamorphiqu schistes		Precambrian tuff and radiolarites

4) Aquifère de l'Eocène (Couche Eo)

On suppose que la couche de l'Eocène est constituée de sédiments de transgression marine de l'époque Eocène faisant suite à la couche du Paléocène et des roches affleurent dans la partie nord-est du projet. On y trouve de nombreuses marnes indurées (sol) et des couches boueuses, avec partiellement des intrusions de roches calcaires et de couches de sable calcaire.

Ces roches calcaires et ces couches de sable calcaire forment l'aquifère de cette couche et il existe des forages équipés de crépines sur cette couche dans le centre de la région de Tambacounda ainsi que dans les zones d'affleurement de cette couche dans la région de Matam. Toutefois, en raison de ses caractéristiques d'eau perchée, il ne peut pas servir d'aquifère principal pour le développement des eaux souterraines.

5) Aquifère du Continental terminal/ Oligo-Miocène (Couche Co)

Cette couche est généralement appelée couche du Continental terminal mais elle est aussi parfois dénommée couche de l'Oligo-Miocène. Elle est principalement constituée de couches de sable boueux allant jusqu'à des couches de sable fin, avec des intrusions partielles de calcaire. Par ailleurs, cette couche est répartie en épaisseur dans la partie Sud de la région de Tambacounda, et la couche du Maastrichtien étant également profonde ici, elle est exploitée en tant que principale aquifère. D'autre part, dans la région de Matam (et en particulier dans la région est), cette couche est peu profonde et elle ne convient par conséquent pas en tant qu'aquifère pour le développement des eaux souterraines.

6) Aquifère du Quaternaire (Couche Q)

La couche du Quaternaire est composée de couche de roches carbonatées marines comprenant des coquillages, de sédiments alluvionnaires, de sédiments lacustres et de sédiments éoliens, entre autres. Dans la région du présent projet, l'exploitation des eaux souterraines dans la couche alluvionnaire le long du fleuve Sénégal fait actuellement l'objet de discussions.

(2) Structures hydrogéologiques

1) Elaboration de coupes géologiques

Les relevés de foration de chacun des forages ont été classifiés sous forme de colonnes lithostratigraphiques (se reporter au Recueil des données) et, parallèlement, les plans en coupe reportant ces colonnes, ainsi présentés dans les pages suivantes (Figure 3-2-4 à Figure 3-2-8), ont été élaborés pour servir de documents de base dans l'étude des structures hydrogéologiques.

2) Epaisseurs des aquifères et profondeurs de la surface du socle

Les profils stratigraphiques de 400 forages environ, ont été classifiés dans la zone de couche sédimentaire et dans la zone de roches du socle. Pour les profils stratigraphiques de la zone de couche sédimentaire en particulier, après avoir étudié les limites des aquifères pour chaque forage conformément au faciès, une carte des épaisseurs des couches (Figure 3-2-9) et une carte des profondeurs de la surface du socle (Figure 3-2-10), telles que présentées dans les pages suivantes, ont été élaborées afin non seulement de servir de données de saisie pour le modèle de simulation, mais également de données de base lors de l'étude des couches de prise d'eau pour les nouveaux forages du PD. Les cartes des épaisseurs des couches ainsi que les cartes des profondeurs de la surface du socle sont présentées en totalité dans le Rapport de soutien (paragraphe 6.3.1)

3) Particularités des structures hydrogéologiques

Les éléments suivants peuvent être énoncés en tant que particularités des structures hydrogéologiques dans la région du projet.

- (1) Profondeur de la surface du socle : elle augmente brusquement aux alentours des limites avec les roches du socle et va de plus en plus en profondeur en allant vers l'ouest. Par ailleurs, dans la région ouest à partir de Tambacounda, elle présente une courbe douce en forme de vallée.
- (2) Profondeur de la couche Ma : la profondeur de cette couche augmente de l'est de Tambacounda à la partie sud-ouest de la région. Dans le sud en particulier, la profondeur change brusquement à la limite de la direction sud-nord. Dans la ligne de prolongation de cette limite, le fleuve Gambie s'écoule du nord au sud et la direction de son écoulement change et devient perpendiculaire au côté en aval. On peut envisager que cela indique la présence d'une structure géologique quelconque, comme une faille ou un pli. Toutefois, aucune explication détaillée n'ayant pu être fournie par la présente étude, les résultats sont attendus pour une étude ultérieure.
- (3) Zone allant de la partie est de la région de Matam au nord de Goudiry : cette zone se situe à l'est de la limite indiquée en (2) et la couche Co, comme la couche Eo et la couche Pa, ont toutes les trois peu d'épaisseur. Le développement des eaux souterraines dans ces aquifères est difficile et seule la couche Ma constitue la zone de l'aquifère.

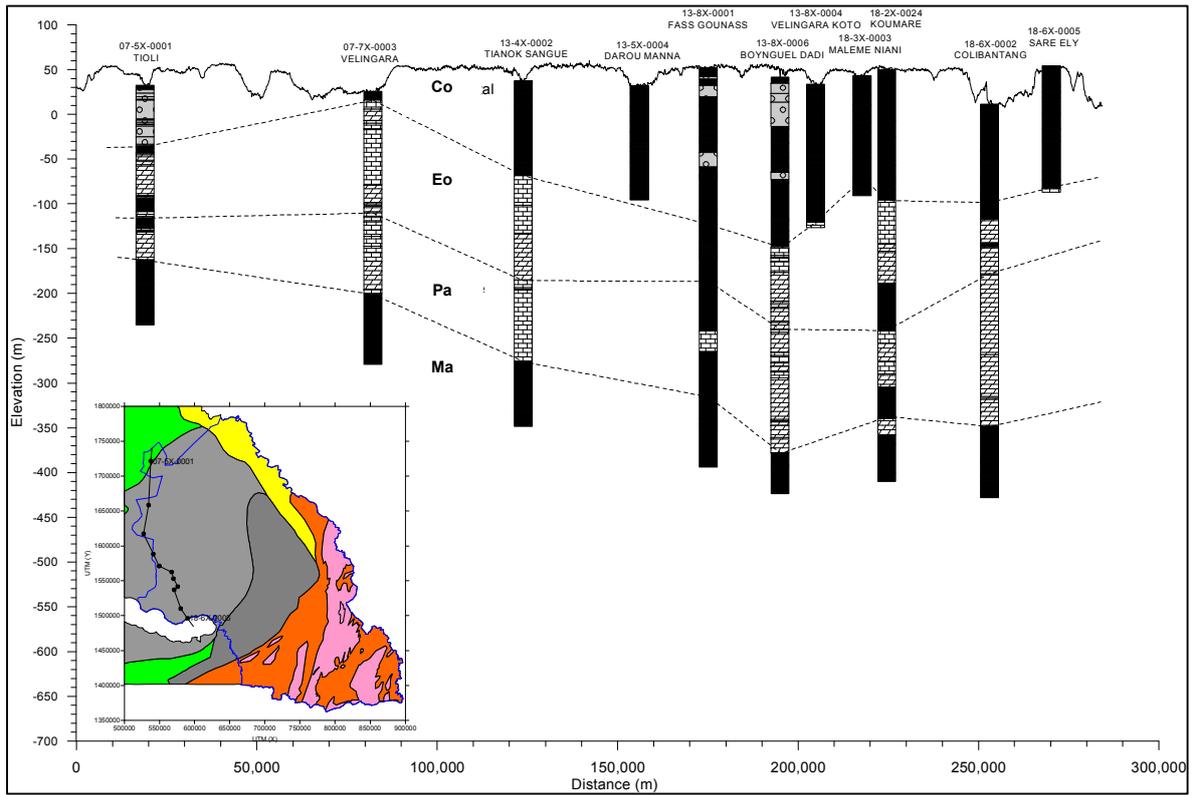


Figure 3-2-4 Coupe géologique (1)

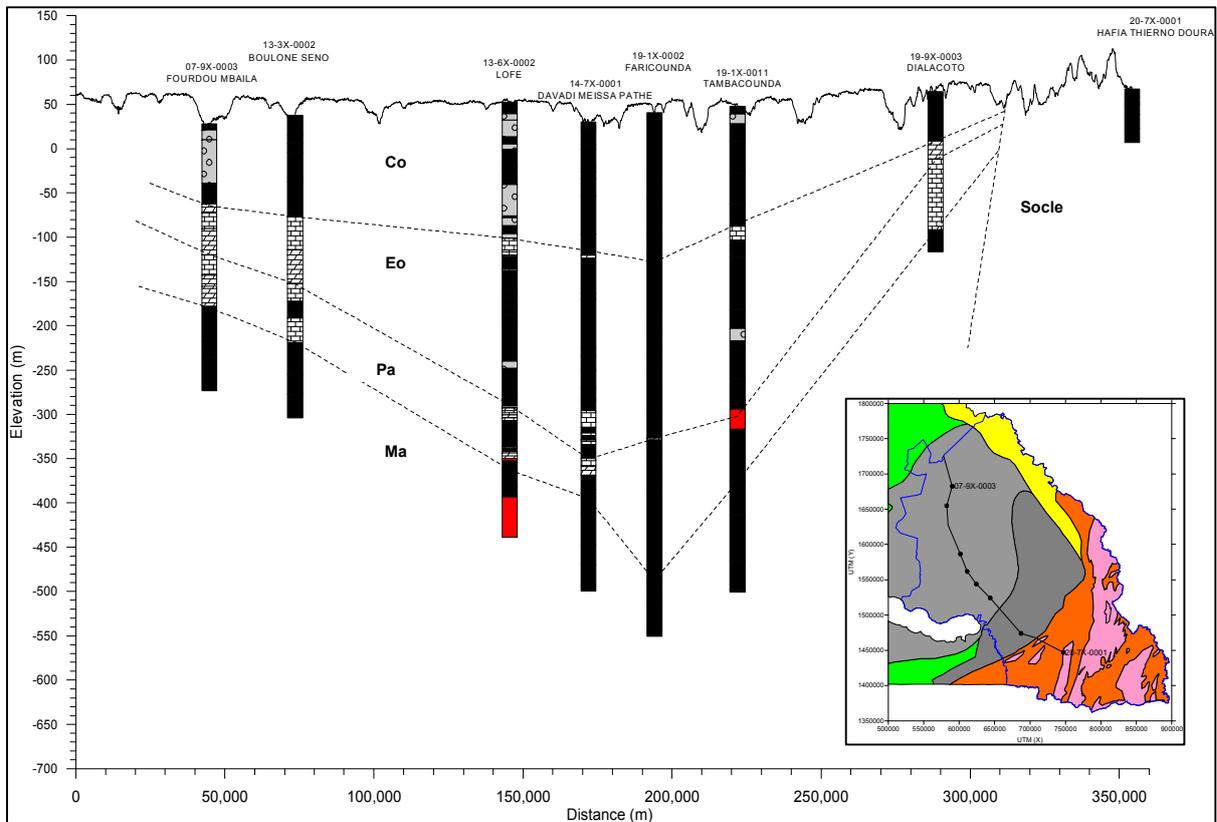


Figure 3-2-5 Coupe géologique (2)

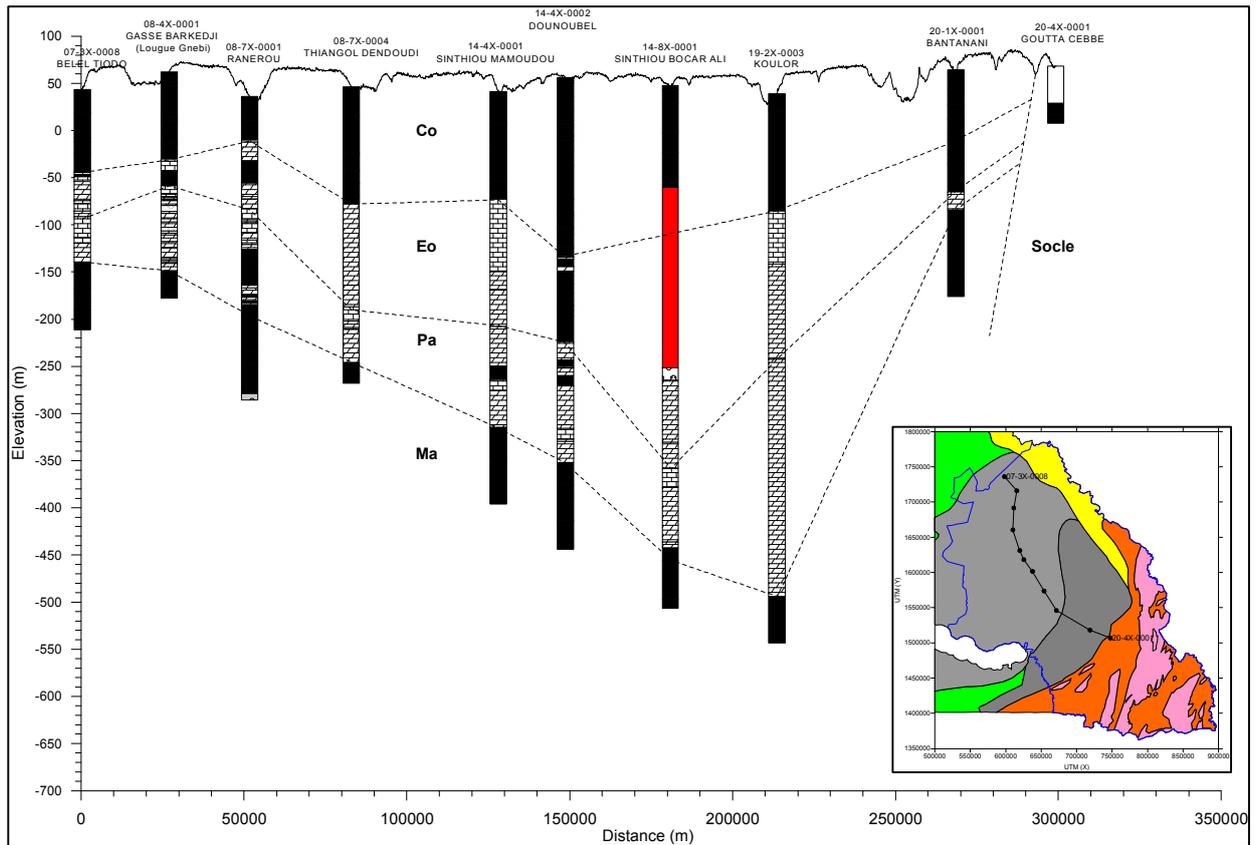


Figure 3-2-6 Coupe géologique (3)

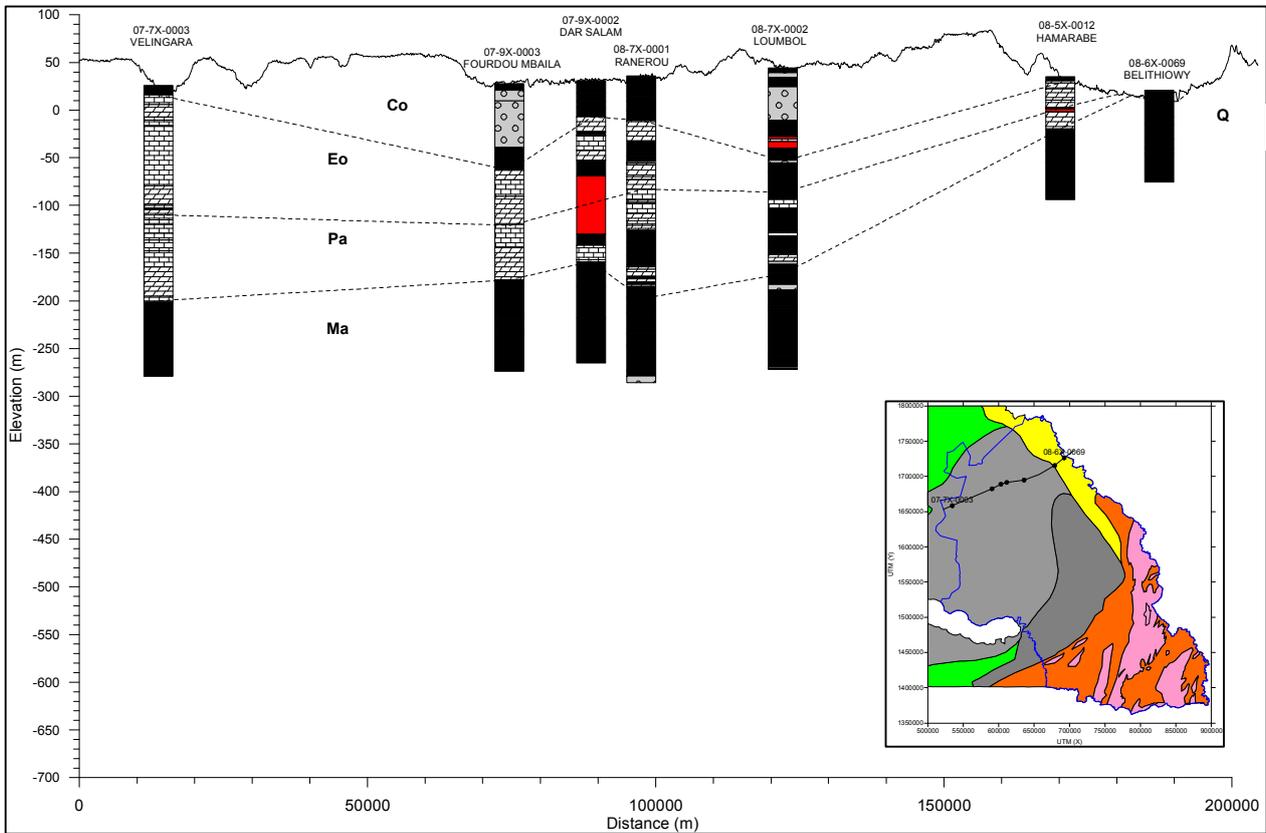


Figure 3-2-7 Coupe géologique (4)

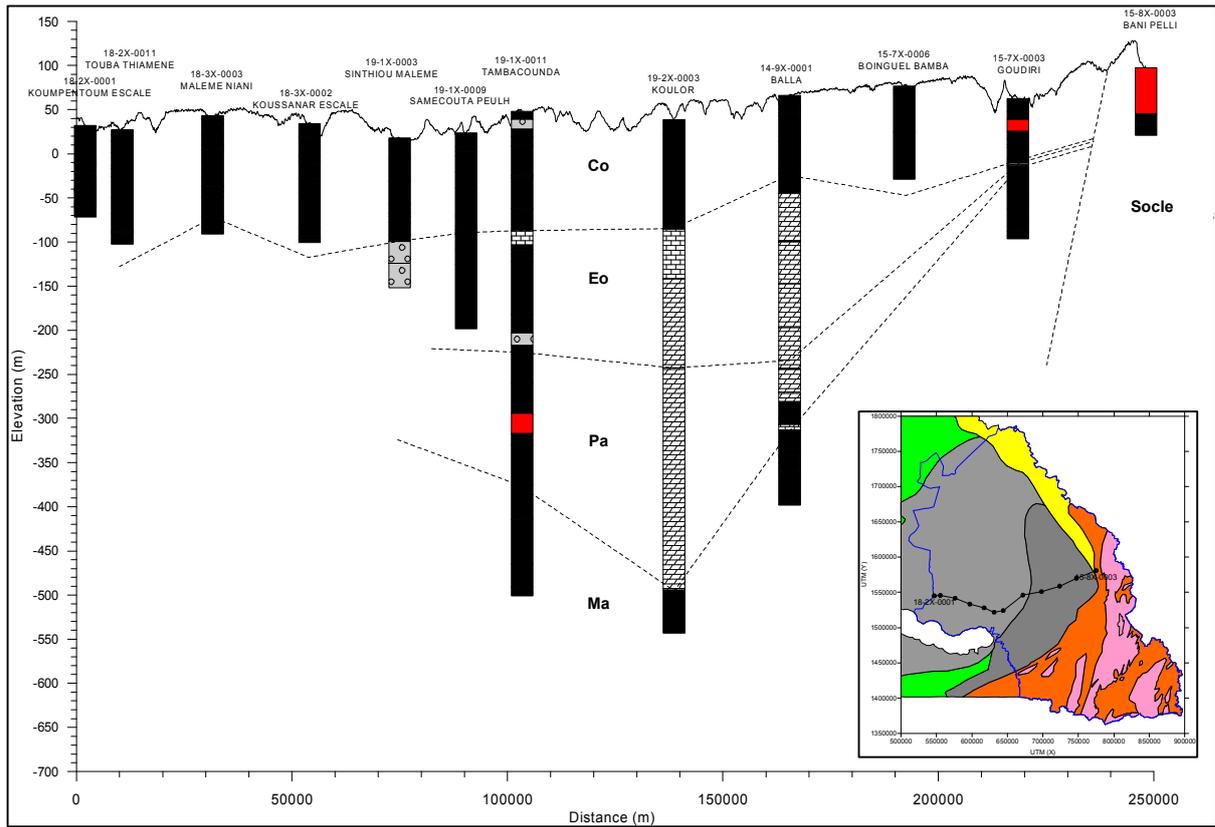
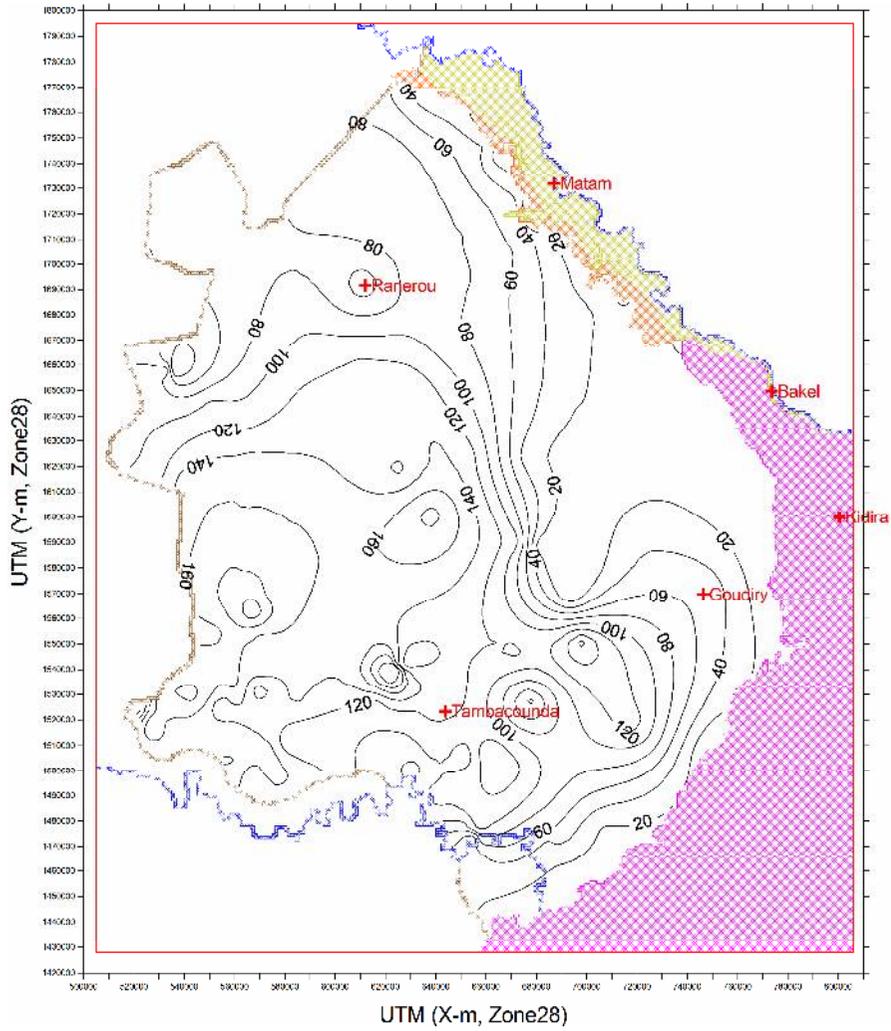
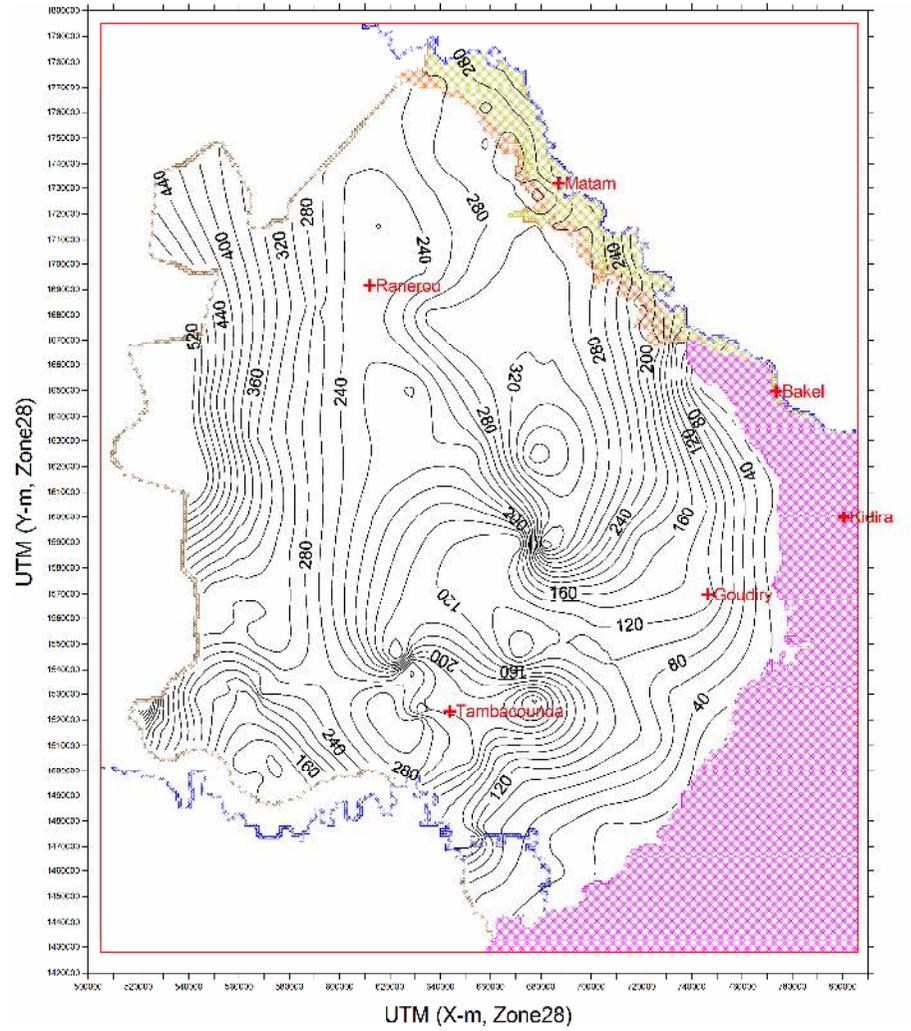


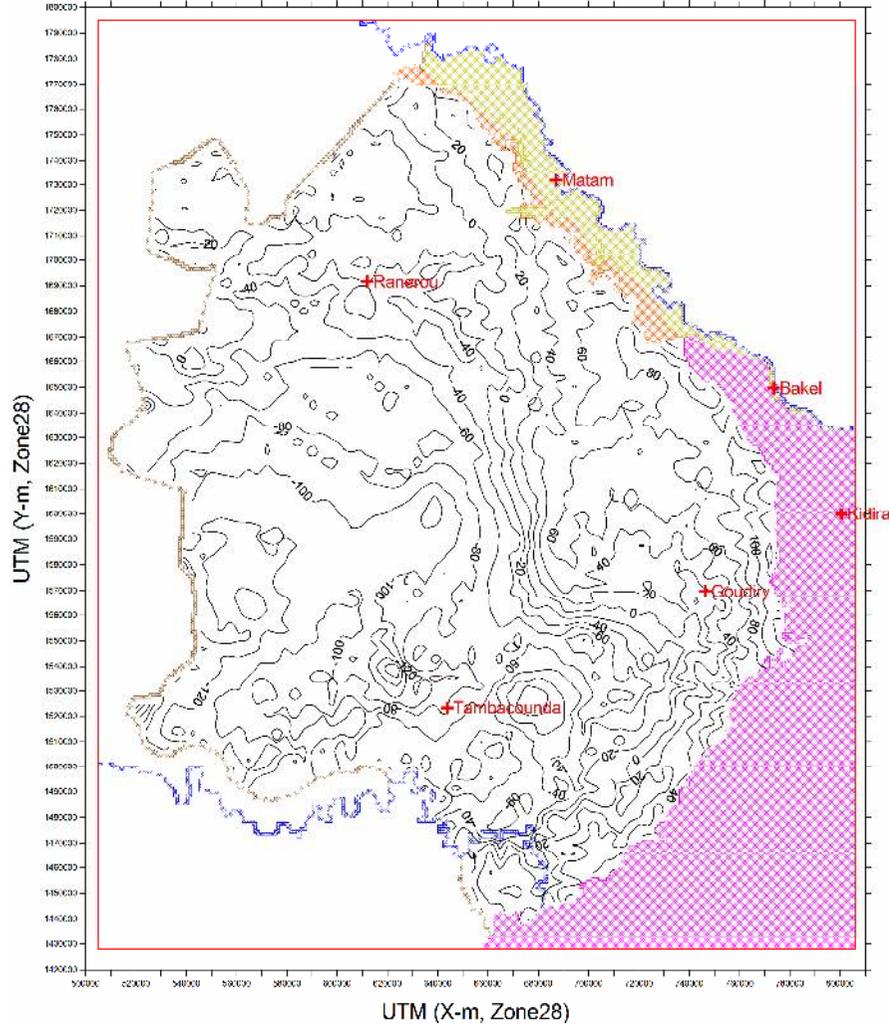
Figure 3-2-8 Coupe géologique (5)



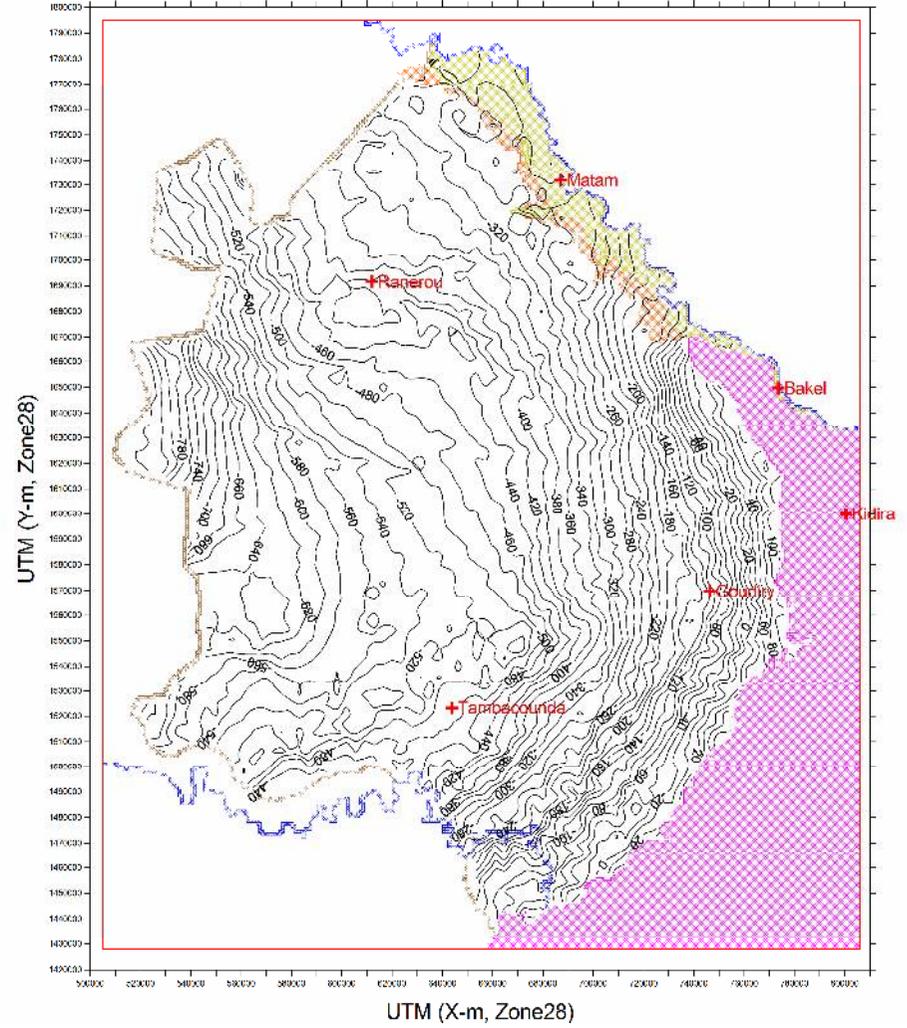
(Répartition de l'épaisseur de la Couche Co)



(Répartition de l'épaisseur de la Couche Ma)
Figure 3-2-9 Exemple de la répartition de l'épaisseur



(Répartition de la profondeur de la surface de base de la Couche Co)



(Répartition de la profondeur de la surface de base de la Couche Ma)

Figure 3-2-10 Exemple de la répartition de la profondeur de la surface de base

3.2.4 Niveau et mouvement du débit des eaux souterraines

(1) Fluctuation du niveau des eaux souterraines (Collecte et classification des données de surveillance de la DGPRE)

1) Objectif et méthode de l'étude

Les résultats du résumé ont été utilisés comme données de vérification lors de la simulation de l'écoulement des eaux souterraines.

2) Résultats de l'étude

La Figure 3-2-11 indique l'emplacement des points d'eau de surveillance de la DGPRE, et le Tableau 3-2-2 leurs caractéristiques. La Figure 3-2-12 indique les variations de niveau des eaux souterraines de chaque point d'eau de surveillance. Les résultats du résumé ont été utilisés en tant que données de vérification lors de la simulation de l'écoulement des eaux souterraines.

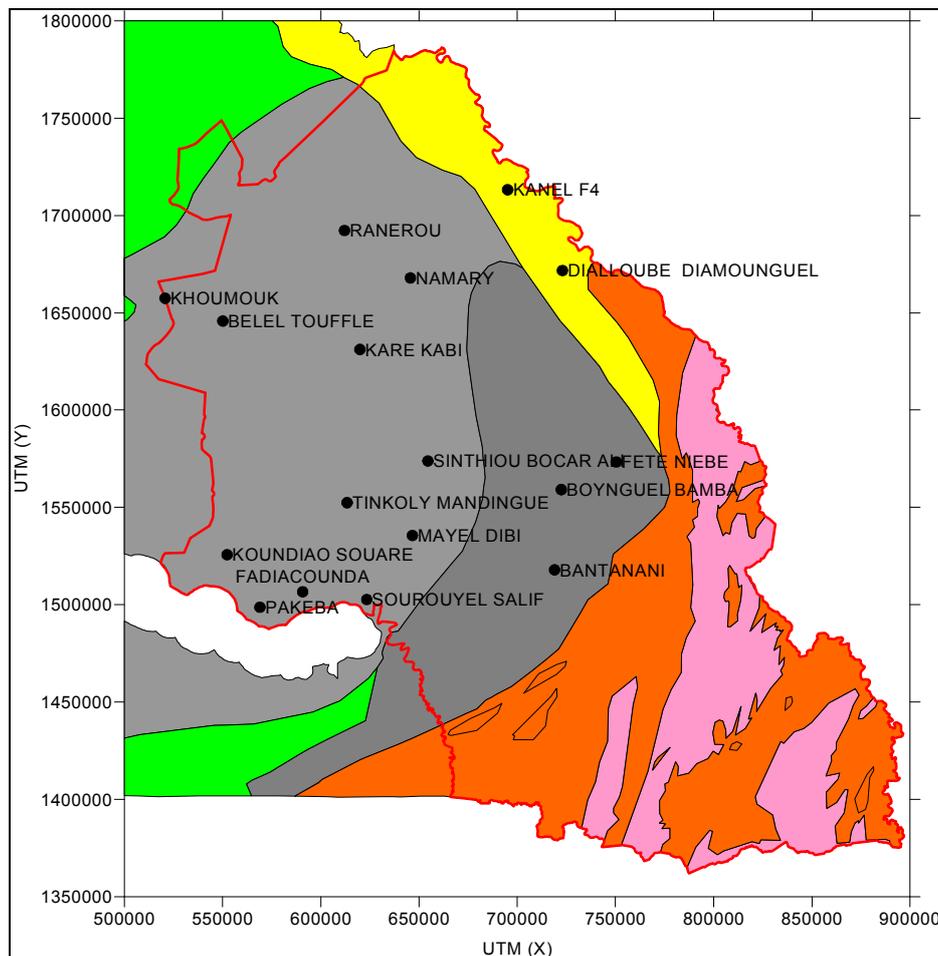


Figure3-2-11 Carte de localisation des points d'eau de surveillance de la DGPRE

Tableau3-2-2 Caractéristiques des points d'eau de surveillance de la DGPRE

No_IRH	Village	Longitude	Latitude	Nappe phréatique	Points d'eau	Elévation repère (m)
20-1X-0001	BANTANANI	-12,9750	13,7222	Maast	Forage	56,88
13-2X-0002	BELEL TOUFFLE	-14,5347	14,8856	Maast	Forage	23,19
15-7X-0001	BOYNGUEL BAMBA	-12,9400	14,0942	Maast	Piézomètre	52,07
09-7X-0016	DIALLOUBE DIAMOUNGUEL	-12,9250	15,1111	Maast	Forage	54,42
18-6X-0007	FADIACOUNDA	-14,1611	13,6269	cpx,t	Forage	10,30
08-6X-0011	KANEL F4	-13,1811	15,4883	Maast	Piézomètre	(25,62)
14-1X-0002	KARE KABI	-13,8861	14,7514	Maast	Forage	53,46
13-1X-0005	KHOUMOUK	-14,8075	14,9917	Maast	Forage-puits	(49,48)
18-2X-0009	KOUNDIAO SQUARE	-14,5167	13,8000	Maast	Forage-puits	31,79
19-2X-0002	MAYEL DIBI	-13,6431	13,8861	cpx,t	Forage	21,37
08-8X-0001	NAMARY	-13,6456	15,0822	Maast	Forage-puits	39,62
18-5X-0004	PAKEBA	-14,3625	13,5556	cpx,t	Forage	15,74
08-7X-0001	RANEROU	-13,9569	15,3042	Maast	Forage	(40,74)
14-8X-0001	SINTHIOU BOCAR ALI	-13,5681	14,2319	Maast	Forage	42,01
15-7X-0002	FETE NIEBE	-12,6800	14,2200			(71,59)
19-4X-0006	SOUROUYEL SALIF	-13,8600	13,5900	cpx,t	Piézomètre	(32,03)
14-7X-0002	TINKOLY MANDINGUE	-13,9500	14,0400	cpx,t		(26,91)

*: Explication du Forage-puits; Composé d'un puits creusé à la main en haut et d'un forage en bas

** : Les chiffres indiqués entre parenthèse indiquent l'élévation estimée de SRTM-3.

(2) Répartition des eaux souterraines

Dans la région du projet, il n'existe pas de données d'observation correspondant à des mesures simultanées des niveaux d'eau. En outre, de nombreux forages actuellement en cours de fonctionnement sont équipés de pompes verticales et il est par conséquent difficile de procéder de nouveau à ces mesures simultanées des niveaux.

Par conséquent, un calcul non stationnaire à long terme (calcul quasi-stationnaire) a été effectué au début de l'analyse de simulation indiquée ci-après sur la base des données du niveau d'eau statique au moment de la foration (avant la vérification de l'interpolation), et la répartition des niveaux des eaux souterraines a pu être déterminée (Figure 3-2-13). Ces résultats ont été retenus comme niveaux d'eau initiaux pour la simulation des eaux souterraines. Par ailleurs, la carte des niveaux des eaux souterraines, calculés pour tous les aquifères, est présentée dans le Rapport de soutien (paragraphe 6.3.1).

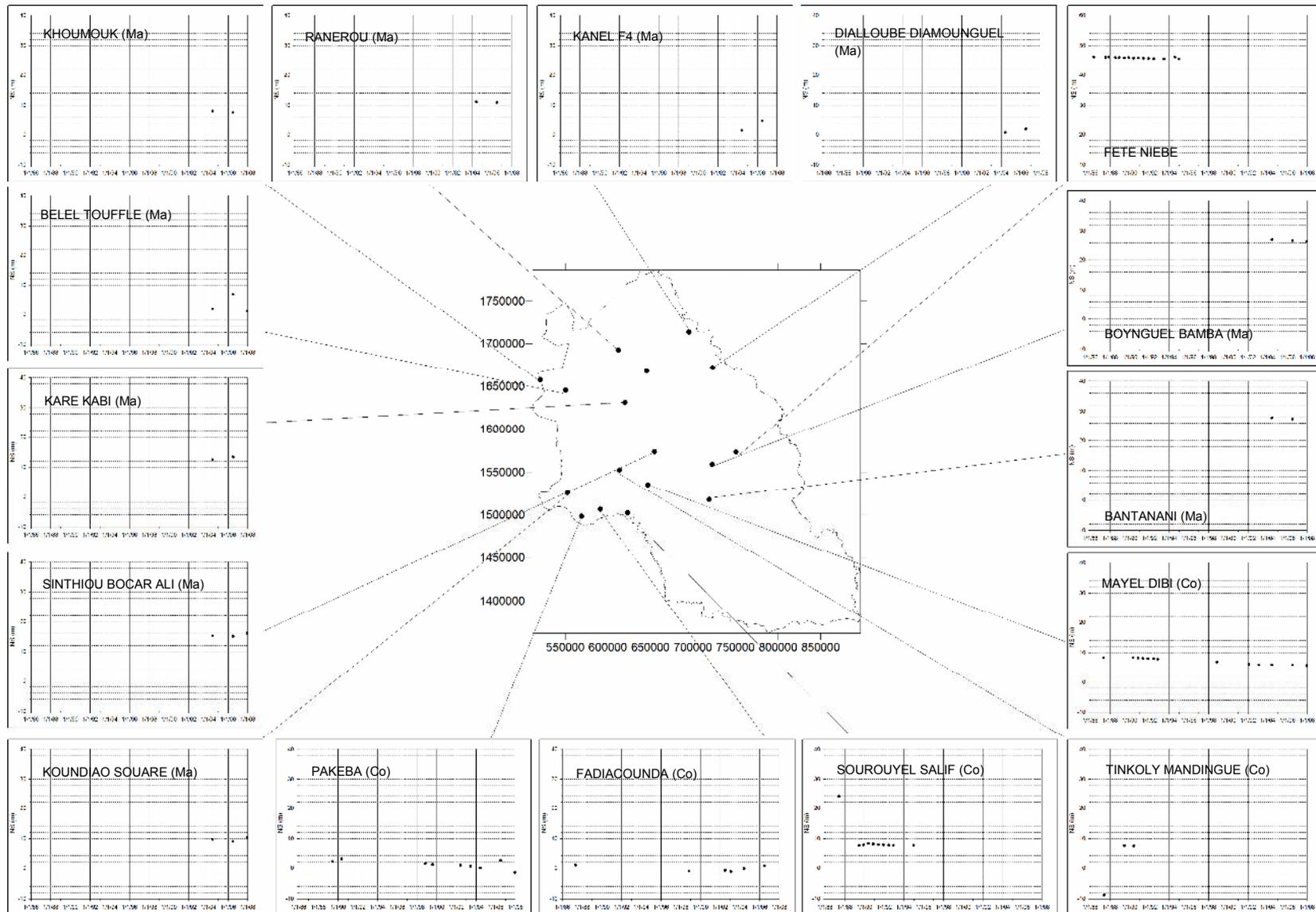
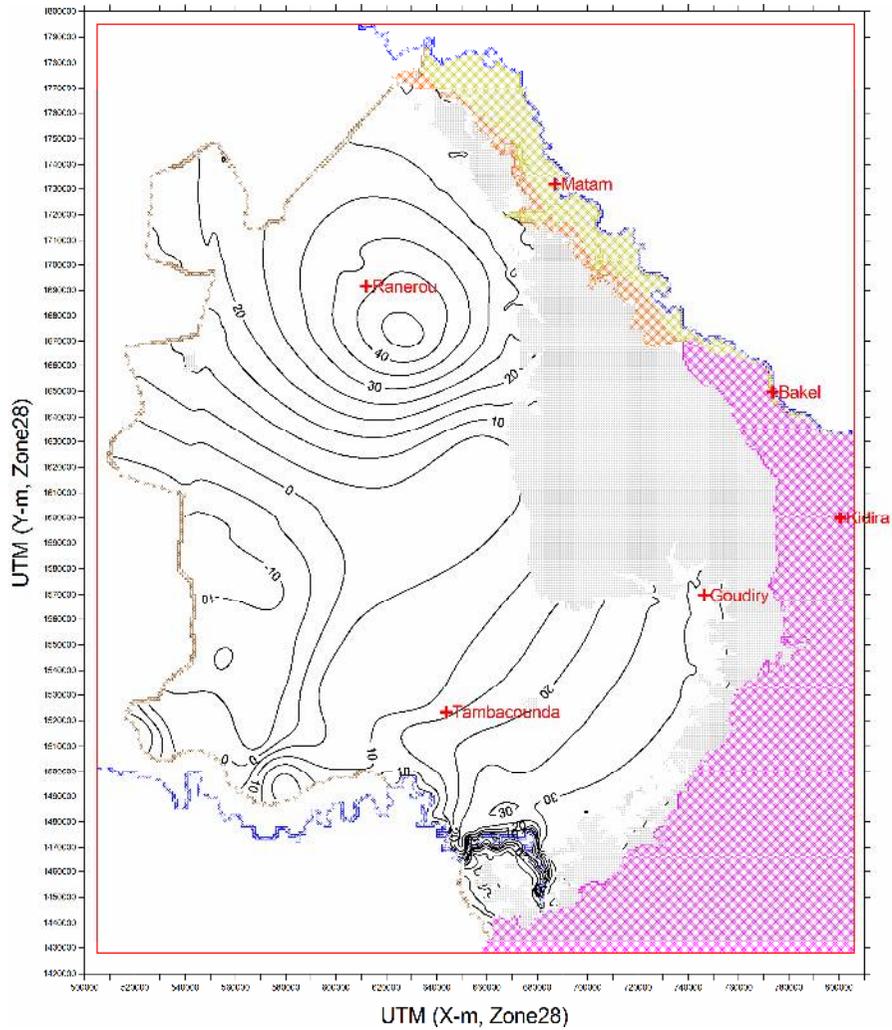
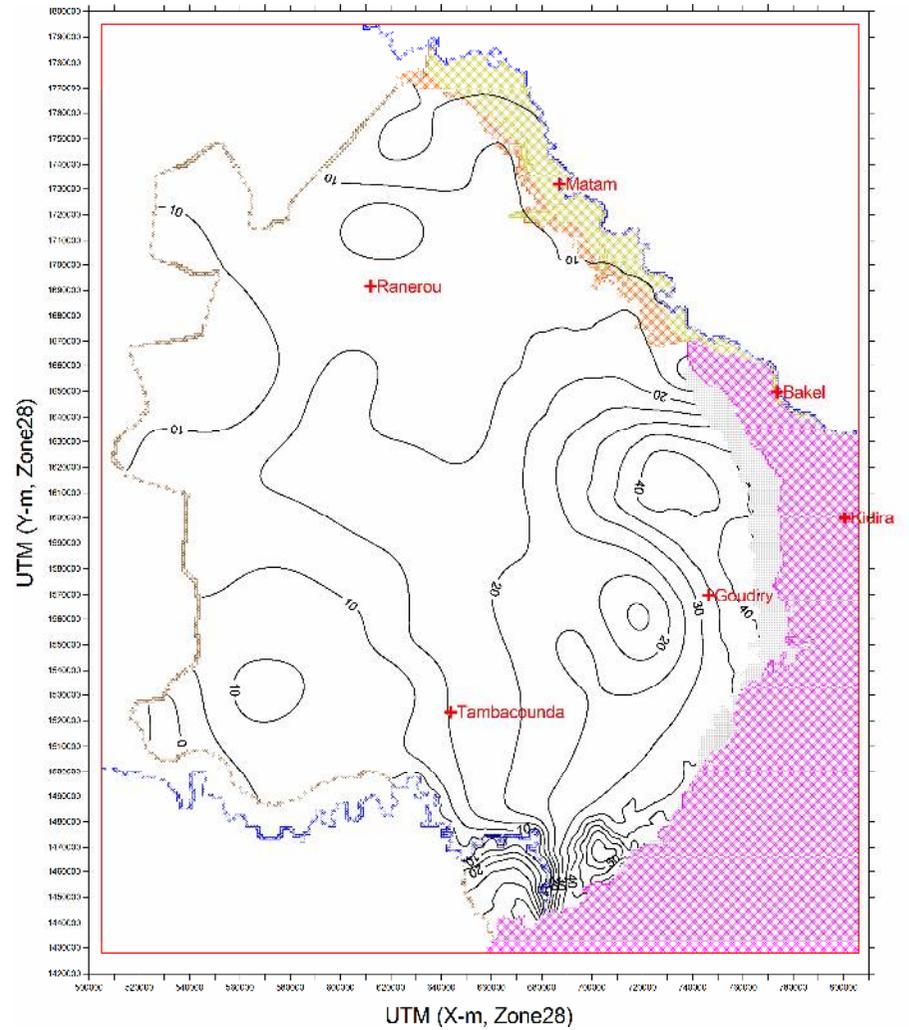


Figure 3-2-12 Variations du niveau des eaux souterraines des points d'eau de surveillance de la DGPRE



(Hauteurs d'eau initiales calculées de la couche Co)



(Hauteurs d'eau initiales calculées de la couche Ma)

Figure 3-2-13 Exemple de répartition des hauteurs d'eau initiales calculées (unité : altitude m)

(3) Ecoulement des eaux souterraines

Au Sénégal, diverses études ont été effectuées par la DGPRE, la SONES et l'université de Dakar, entre autres, sur le potentiel des eaux souterraines. Toutefois, comme indiqué ci-dessus, l'étude actuellement considérée comme fondamentale pour l'explication des ressources en eaux souterraines au Sénégal, est l'étude du potentiel des eaux souterraines effectuée sur l'ensemble du pays entre 1994 et 2000 et résumée en 2001 par la DGPRE (Consultant chargé de l'exécution : COWI) et portant principalement sur la couche du Maastrichtien. En outre, les résultats de cette étude ont été convertis en graphique à l'aide d'un logiciel SIG (WinGeo) et ont permis de fournir des données importantes telles que des cartes des épaisseurs de la couche Ma, des cartes de répartition des niveaux des eaux souterraines, des cartes de répartition des coefficients de transmissivité, ainsi que des cartes des teneurs de la qualité de l'eau, entre autres. Par ailleurs, en ce qui concerne les cartes de répartition des coefficients de transmissivité, des études telles que la "Synthèse des propriétés de réservoir, des électro-faciès et des faciès sédimentologiques de l'aquifère maastrichtien : Etablissement d'un outil d'équivalence (DOUMOYA, 1988)" et la "Contribution à l'étude de la nappe maastrichtien du bassin sédimentaire sénégalais : géométrie de l'aquifère, synthèse des paramètres hydrodynamique et hydrochimique (DIOUF, 1994)" ont été publiées. En outre, l'étude de la DGPRE (2001) ne se limite pas à la couche Ma mais effectue également l'analyse des autres aquifères et des cartes de répartition des coefficients de transmissivité ont été réalisées pour la couche Pa et la couche Co.

D'autre part, les résultats importants de l'étude de la DGPRE (2001) ont été d'identifier la direction de l'écoulement des eaux souterraines de la couche Ma, de présenter les possibilités de recharge des eaux souterraines à partir des cours d'eau et les jaillissements des eaux souterraines dans la partie intérieure (Figure 3-2-14), renversant ainsi les notions passées d'un simple écoulement des eaux souterraines allant des zones montagneuses (zone des roches du socle) jusqu'à la mer (par exemple, d'après la carte piézométrique établie par Audibert en 1971).

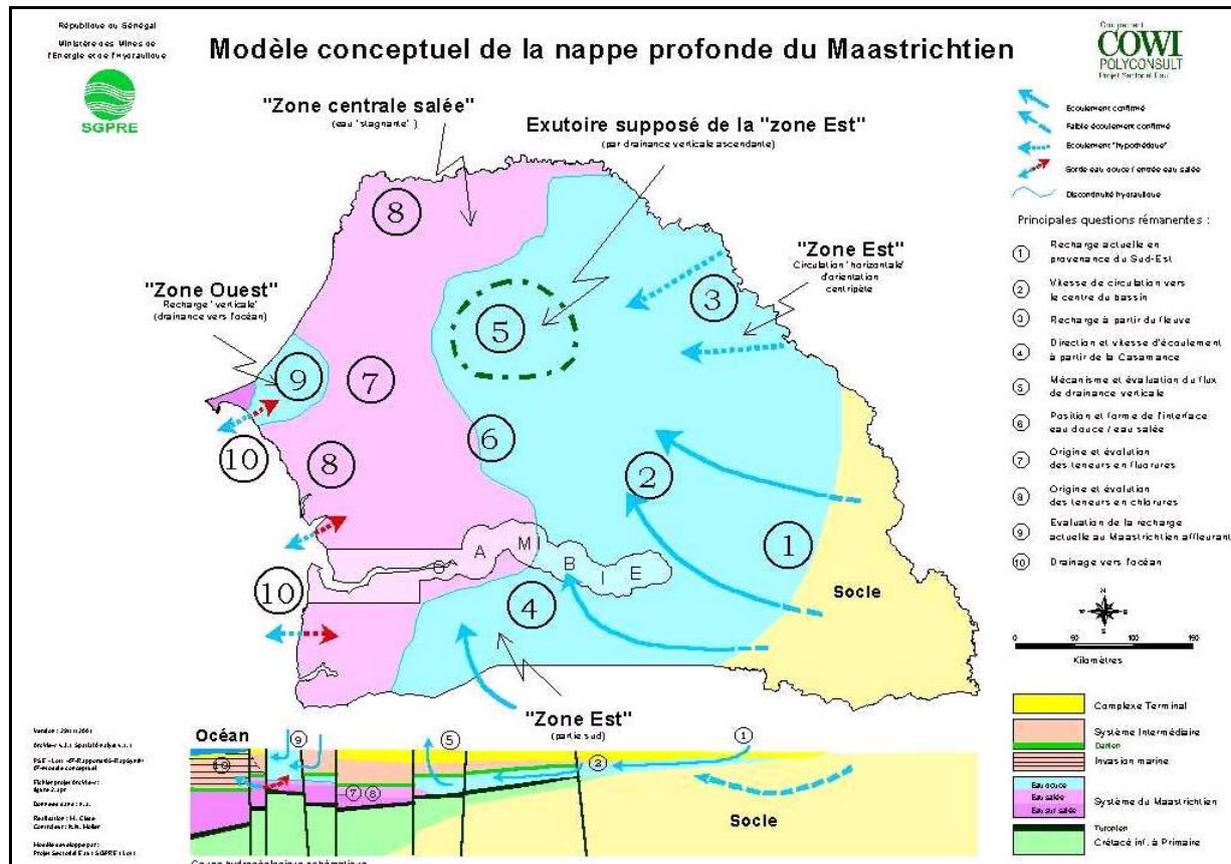


Figure 3-2-14 Orientation des eaux souterraines dans la couche du Maastrichtien (Source : Document DGPRE)

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.

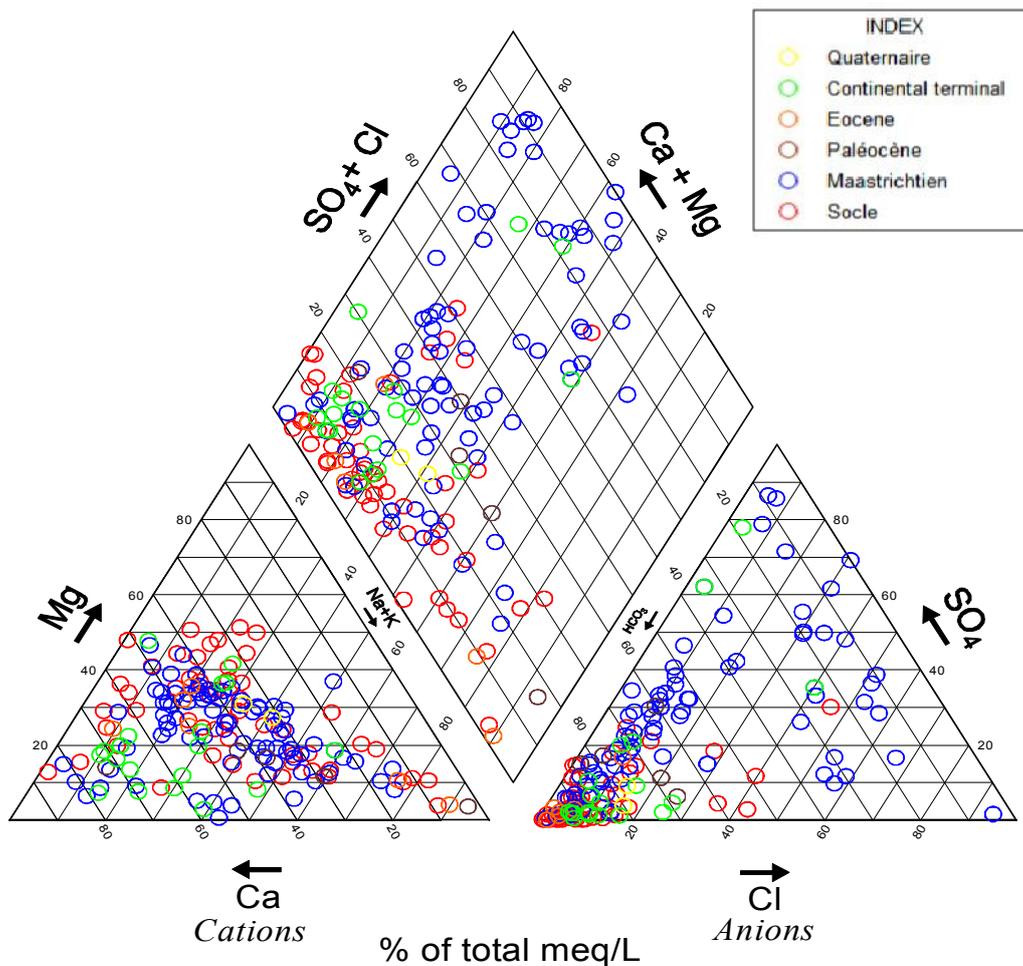


Figure 3-2-15 Diagramme trilinéaire des eaux souterraines

(2) Mercure

Une étude a été menée sur le niveau de contamination des puits et des forages dans les villages où le raffinage de l'or a lieu selon la méthode traditionnelle avec emploi du mercure. Les résultats de l'analyse des 22 échantillons prélevés dans 8 villages ont tous montré des valeurs inférieures aux critères. Pour la mesure de la teneur en mercure, on a fait appel à l'Institut de Technologie Alimentaire (ITA) de Dakar.

Les résultats sont présentés dans le tableau 3-2-3, avec 0,2 µg/L comme valeur maximum, inférieure aux 6 µg/L (mercure inorganique) de l'OMS, et aucune mesure urgente n'est par conséquent à prendre.

Tableau 3-2-3 Résultats de la mesure du mercure

	No	Village	CR	Eau prélevée comme échantillon	Source	Hg (µg/L)
1	H-1	Khossanto	Khossanto	Bobosori Shisoho	puits	0,1
2	H-2	Khossanto	Khossanto	Karamba Jabi	puits	0,1
3	KH-3	Khossanto	Khossanto	Tamanate	puits	0,2
4	KH-4	Khossanto	Khossanto	Niamakonjira	puits	0,1
5	SA-1	Sabodala	Khossanto	Puits-village-marigo	puits	0
6	SA-2	Sabodala	Khossanto	BF-forage	Forage	0,1
7	TB-1	Tinkoto Ba	Tomboronkoto	Daba soulayman	puits	0,1
8	TB-2	Tinkoto Ba	Tomboronkoto	PMH-UNICEF	Forage	0,1
9	TB-3	Tinkoto Ba	Tomboronkoto	CV Bambo Sisoho	puits	0,1
10	TB-4	Tinkoto Ba	Tomboronkoto	Marigo	puits	0,1
11	TB-5	Tinkoto Ba	Tomboronkoto	Marche	puits	0,1
12	TB-6	Tinkoto Ba	Tomboronkoto	Mamadou Dafa	puits	0,1
13	NG-1	Ngari	Tomboronkoto	Prive	Impluvium	0,1
14	NG-2	Ngari	Tomboronkoto	Puits-village	puits	0,1
15	NG-3	Ngari	Tomboronkoto	PMH-UEMOA	Forage	0,2
16	TD-1	Tinkoto Ding	Tomboronkoto	puits-village	puits	0,1
17	TD-2	Tinkoto Ding	Tomboronkoto	PMH-UEMOA	Forage	0,1
18	BA-1	Bantako	Tomboronkoto	PMH-UEMOA	Forage	0,1
19	BA-2	Bantako	Tomboronkoto	PMH-SAUDI	Forage	0,1
20	TO-1	Tomboronkoto	Tomboronkoto	PMH-Forage	Forage	0,1
21	TO-2	Tomboronkoto	Tomboronkoto	PMH-UNICEF	Forage	0,1
22	MA-1	Mako	Tomboronkoto	Fleuve Gambie	F. Gambia	0,1

3.2.6 Analyse des données météorologiques

(1) Données des précipitations

1) Station de mesure

Les données des précipitations quotidiennes dans les stations de mesure climatique indiquées ci-dessous (Tableau 3-2-4) ont été utilisées afin d'élaborer un document de base destiné au calcul du bilan hydraulique ainsi qu'au calcul de réservoir modèle pour l'estimation de la recharge des eaux souterraines, indiqué dans le paragraphe 3.4.

Tableau3-2-4 Caractéristiques de ces stations de mesure utilisées pour la division de Thiessen

Point de mesure	Pays	Longitude	Latitude	UTM (X)	UTM (Y)	Élévation (m)
Matam	Sénégal	15,650	-13,250	687 583	1 730 994	17
Semme	Sénégal	15,200	-12,950	720 225	1 681 480	40
Ranérou	Sénégal	15,300	-13,966	611 011	1 691 772	33
Bakel	Sénégal	14,900	-12,400	779 733	1 648 898	25
Kidira	Sénégal	14,300	-12,100	812 881	1 582 862	35
Goudiri	Sénégal	14,183	-12,716	746 512	1 569 203	59
Tambacounda	Sénégal	13,767	-13,683	642 377	1 522 347	50
Kédougou	Sénégal	12,567	-12,217	802 415	1 390 852	167
Linguere	Sénégal	15,383	-15,177	487 444	1 700 692	21
Dialakoto	Sénégal	13,317	-13,300	684 138	1 472 821	50
Kenieba	Mali	12,850	-11,233	909 010	1 423 541	132

La répartition régionale des précipitations a été classifiée selon la division de Thiessen comme la montre la figure ci-dessous (Figure 3-2-16).

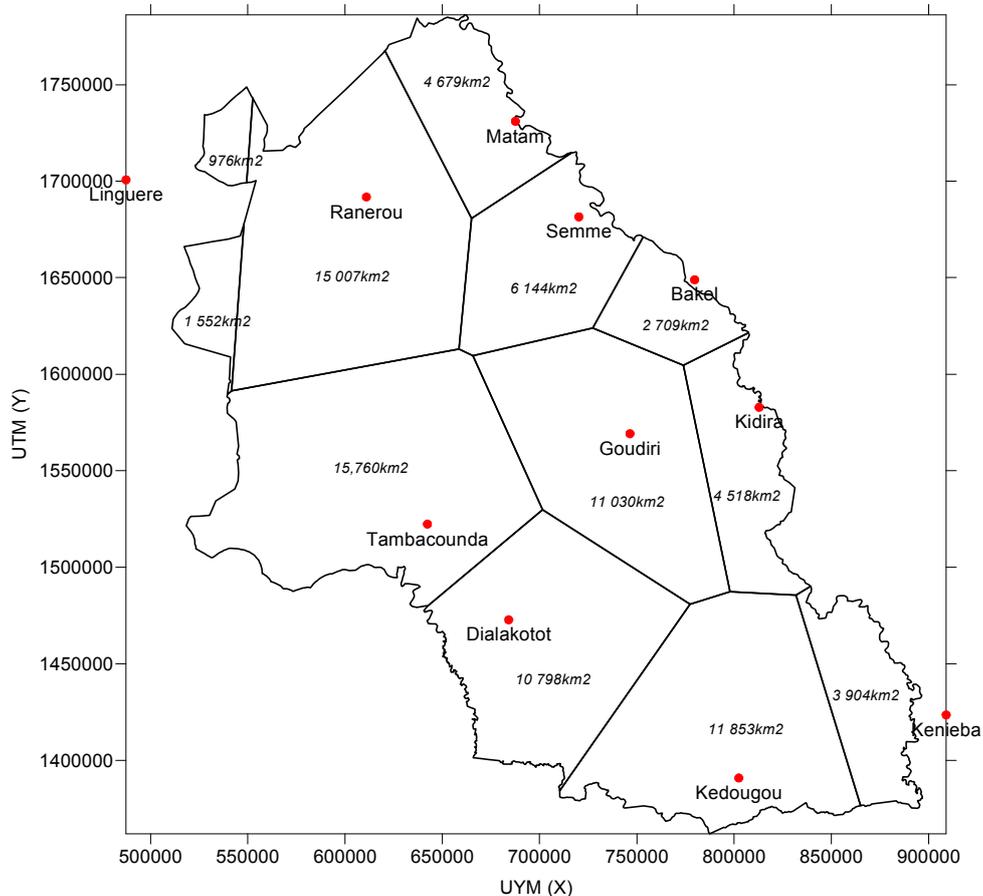


Figure3-2-16 Résultats de la division de Thiessen

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

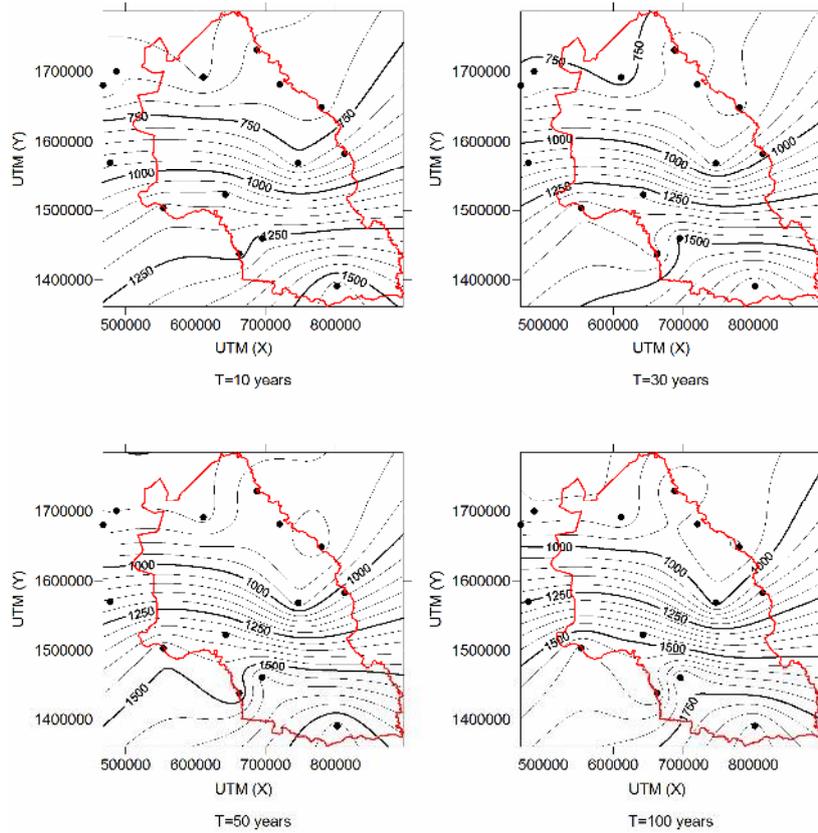


Figure 3-2-17 Distribution des précipitations annuelles stochastiques
 (Probabilité de dépassement = année d'eau abondante, unité des lignes isohyètes: mm/an)

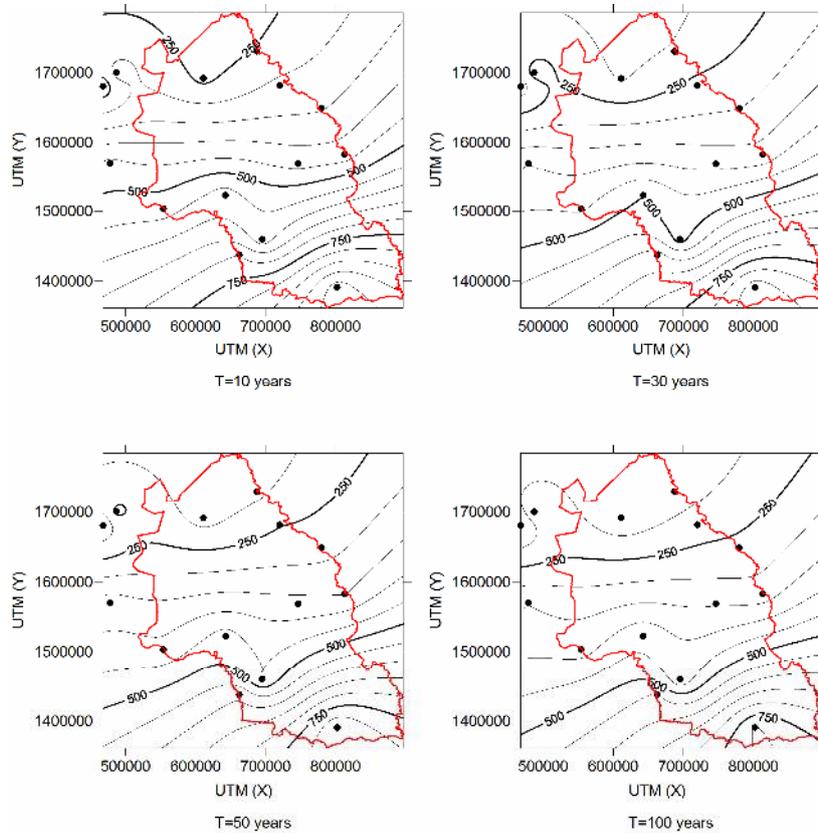


Figure 3-2-18 Distribution des précipitations annuelles stochastiques
 (Probabilité de non-dépassement = année de manque d'eau, unité des lignes isohyètes: mm/an)

(2) Estimation des volumes d'évapotranspiration possibles

Le calcul des volumes d'évapotranspiration possibles a été effectué dans le cadre du présent projet en appliquant la méthode Thornwaite. La méthode de calcul est indiquée dans le Rapport de soutien (paragraphe 6.2). En outre, ce calcul a été effectué dans les stations de mesure climatiques (à l'exception des 5 points de Semme, Kidira, Linguere, Dialakoto et Kenieba où les températures ne sont pas relevées) où la division de Thiessen mentionnée ci-dessus a été réalisée.

Les résultats des calculs des volumes d'évapotranspiration possibles dans chaque point de mesure sont indiqués dans le Rapport de soutien (paragraphe 6.2) et le cas des résultats des calculs de la station de mesure de Matam appliquant le modèle réservoir est présenté ci-dessus. (Tableau 3-2-6) Les résultats des calculs montrent bien les caractéristiques d'une région sèche.

En outre, selon le calcul du modèle réservoir indiqué dans le paragraphe 3.4, le calcul des volumes d'évapotranspiration réelle a été réalisé en utilisant la valeur des volumes d'évapotranspiration possibles.

Tableau3-2-6 Exemple de calcul des volumes d'évapotranspiration possibles
(Station de mesure de Matam, Unité : cm/mois)

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
1988	5,84	13,08	17,58	18,62	20,50	19,63	19,39	17,16	16,21	17,48	14,76	7,65
1989	7,32	13,55	16,70	18,43	20,46	19,33	19,12	17,51	17,14	17,24	15,69	13,94
1990	6,04	14,14	18,06	18,77	20,50	19,75	19,39	18,14	17,14	17,90	15,10	9,20
1991	9,33	12,69	16,37	18,43	20,30	19,75	19,39	18,14	17,14	17,24	15,10	10,60
1992	8,83	13-55	16,01	18,23	20,18	19,75	19,39	18,14	17,66	18,08	14,41	13,10
1993	8,15	13-55	17,58	18,91	20,50	19,75	19,63	18,14	16,53	17,71	15,10	8,72
1994	4,87	13,08	17,30	17,18	20,39	19,63	19,12	16,78	16,53	17,24	15,40	9,65
1995	5,63	13,08	17,02	18,43	20,39	19,90	19,85	17,51	16,85	17,48	15,40	8,49
1996	13,94	14,46	17,02	18,43	20,50	19,75	19,39	17,51	17,41	17,71	15,10	8,83
1997	13,53	14,46	15,63	18,00	20,30	19,33	19,12	18,69	16,53	17,48	15,40	7,99
1998	7,70	14,75	17,30	19,10	20,46	19,90	19,39	17,51	16,53	17,48	14,76	9,04
1999	6,45	8,12	17,02	18,62	20,39	19,63	18,16	17,16	16,21	16,97	14,76	9,39
2000	10,64	12,69	17,83	19,02	20,39	19,14	18,16	16,38	16,53	16,05	14,04	9,23
2001	7,70	12,69	17,30	18,23	20,30	19,49	18,50	18,14	16,53	17,24	14,76	13,94
2002	7,41	13,08	16,70	17,75	20,39	19,49	19,39	18,14	17,14	17,48	14,76	13,10
2003	7,26	13-55	17,58	18,77	20,46	19,49	19,39	17,16	15,47	17,24	15,40	8,84
2004	7,36	13-55	16,70	18,77	20,39	19,63	18,82	17,51	16,53	17,48	15,40	13,10
2005	7,36	12,29	17,83	18,91	20,46	19,49	18,50	17,82	16,53	17,24	15,10	14,34
2006	6,82	12,69	17,30	18,91	20,30	19,75	19,85	17,51	16,85	18,08	15,10	7,65
2007	9,39	13,55	17,30	18,62	20,46	19,75	19,39	17,16	16,53	17,48	14,76	13,10

3.2.7 Collecte et classification des données de mesure des débits des cours d'eau**(1) Objectifs de l'étude**

La compilation des résultats des observations de débit des cours d'eau exécutées par la DGPRE permettra de saisir les particularités des cours d'eau coulant dans la zone d'étude, et ils pourront être utilisés comme données de vérification du modèle réservoir plus loin pour la modification du débit des cours d'eau.

(2) Résultats de l'étude

Les emplacements des stations de mesure du débit des cours d'eau de la DGPRE sont indiqués dans la Figure 3-2-19 et les différents facteurs de ces stations de mesure sont résumés dans le Tableau 3-2-7. Par ailleurs, les fluctuations des débits des cours d'eau dans chaque station de mesure sont présentées dans les Figures 3-2-20 à 3-2-23.

La grande particularité dans le débit des cours d'eau de la zone d'étude est que le débit du fleuve Sénégal diminue d'aval en amont du fleuve. Le débit est moins important à la station de Matam en

aval qu'à la station de Bakel en amont, et il diminue encore à la station de Salde encore plus en aval. Par ailleurs, les données de mesure des niveaux des cours d'eau ont été utilisées en tant que références pour déterminer les conditions limites (limites générales de hauteur d'eau) de la simulation des eaux souterraines, mentionnée au paragraphe 3.4.

Tableau3-2-7 Caractéristiques des stations de mesure du débit des cours d'eau de la DGPRE

No	Désignation		Position			Début de mesure
	ID	Station de mesure	Longitude	Latitude	Elévation (m)	
<i>Bassin Gambie</i>						
<i>Rivière GAMBIE</i>						
1	Fass	FASS	646 240	1 468 861	1	1972
2	Gouloumbou	GOULOUMBOU	638 767	1 489 341	1	1953
3	Guénoto	GUENOTO	628 114	1 498 270	—	1960
4	Kédougou	KEDOUGOU	806 461	1 388 858	102	1970
5	Mako	MAKO	786 878	1 421 677	75	1970
6	Simenti	SIMENTI	684 350	1 441 435	10	1970
7	WassAmont	WASSADOU-AMONT	676639	1 476 322	5	1970
8	WassAval	WASSADOU-AVAL	675 558	1 475 983	4	1973
<i>Rivière KOULOUNTOU</i>						
9	Koulountou	KOULOUNTOU AU GUE DU	664 665	1 413 654	13	1972
10	MissiraGoun	MISSIRA GOUNAS	649 975	1 459 667	2	1970
<i>Rivière DIARHA</i>						
11	Diarha	DIARHA AU PONT-ROUTIER	742 140	1 395 435	47	1972
<i>Rivière TIOKOYE</i>						
12	Tiokoye	TIOKOYE AU PONT	767 514	1 390 426	56	1971
<i>Rivière SILING</i>						
13	Sili	SILI AU PONT ROUTIER	797 116	1 387 984	112	1974
<i>Rivière DIAGUIRI</i>						
14	Diaguiri	DIAGUIRI AU PONT ROUTIER	816 259	1 397 844	94	1974
<i>Rivière NIOKOLO KOKA</i>						
15	NiokoloKoba	NIOKOLO KOKA AU PONT	747 125	1 446 287	48	1970
<i>Rivière NIERI KO</i>						
16	Goumbeyell	GOUMBAYEL	697 265	1 514 307	—	1977
17	NiériKo	NIERI KO AU PONT	678 148	1 477 406	6	1970
<i>Rivière SANDOUGOU</i>						
18	Maka	MAKA	575 703	1 510 964	4	1970
19	SintiouMalem	SINTIOU MALEM	617 919	1 527 192	6	1973
<i>Rivière NIAOULE</i>						
20	NiaouleTanou	NIAOULE TANOU	642 547	1 490 965	9	1972
<i>Rivière KOUSSANAR</i>						
21	Koussanar	KOUSSANAR	598 980	1 533 107	9	1973
<i>Rivière MAMACOUNDA</i>						
22	Dialakoro	DIALAKORO	633 040	1 744 439	—	1989
<i>Bassin Sénégal</i>						
<i>Rivière Sénégal</i>						
23	Bakel	BAKEL	774 350	1 648 836	11	1904
24	Diorbivol	DIORBIVOL	637 307	1 782 260	2	1938
25	Kaedi	KAEDI	660 396	1 784 264	3	1903
26	Koungani	KOUNGANI	779 819	1 641 515	12	1955
27	Matam	MATAM	687 583	1 730 994	6	1903
28	Nguiguilone	N'GUIGUILONE	676 615	1 762 256	4	1951

Désignation			Position			Début de mesure
No	ID	Station de mesure	Longitude	Latitude	Elévation (m)	
29	Ouaoude	OUAOUNDE	729 198	1 687 100	8	1951
<i>Rivière Falémé</i>						
30	Kidira	KIDIRA	800 156	1 599 316	19	1930
31	Gourbassi	GOURBASSI	864 717	1 483 856	—	1954
<i>Rivière Diamel</i>						
32	Cuv_Mbakhn	Cuvette de Mbakhna	668 643	1 754 559	—	1997
33	Cuv_Nabadji	Cuvette de Nabdji (Réfèrece)	675 495	1 741 244	—	1997
<i>Rivière Tourimé</i>						
34	Cuv_Tuabou	Cuvette de Tuabou (Lothiandé)	771 800	1 655 328	—	2000
35	Cuv_Yelinga	Cuvette de Yelingara (Mani)	766 256	1 660 203	—	2000
<i>Rivière Inconnue</i>						
36	Cuv_SinFiss	Retenue collinaire de Sintiou	782 208	1 593 137	—	2000

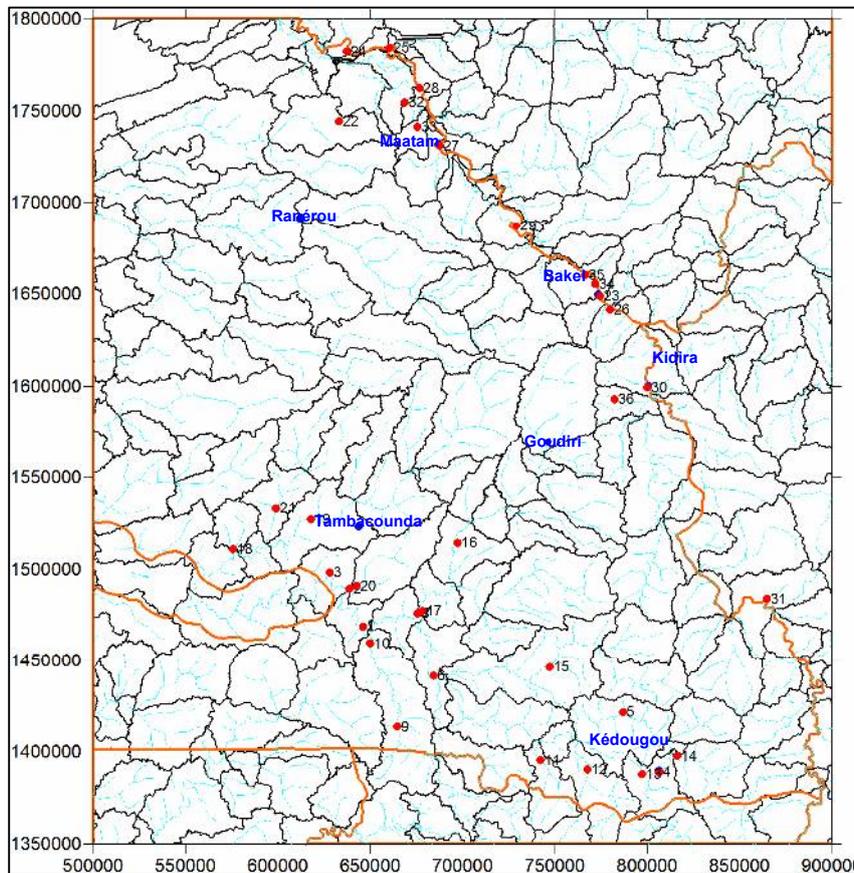


Figure 3-2-19 Carte de localisation des stations de mesure du débit des cours d'eau de la DGPRES

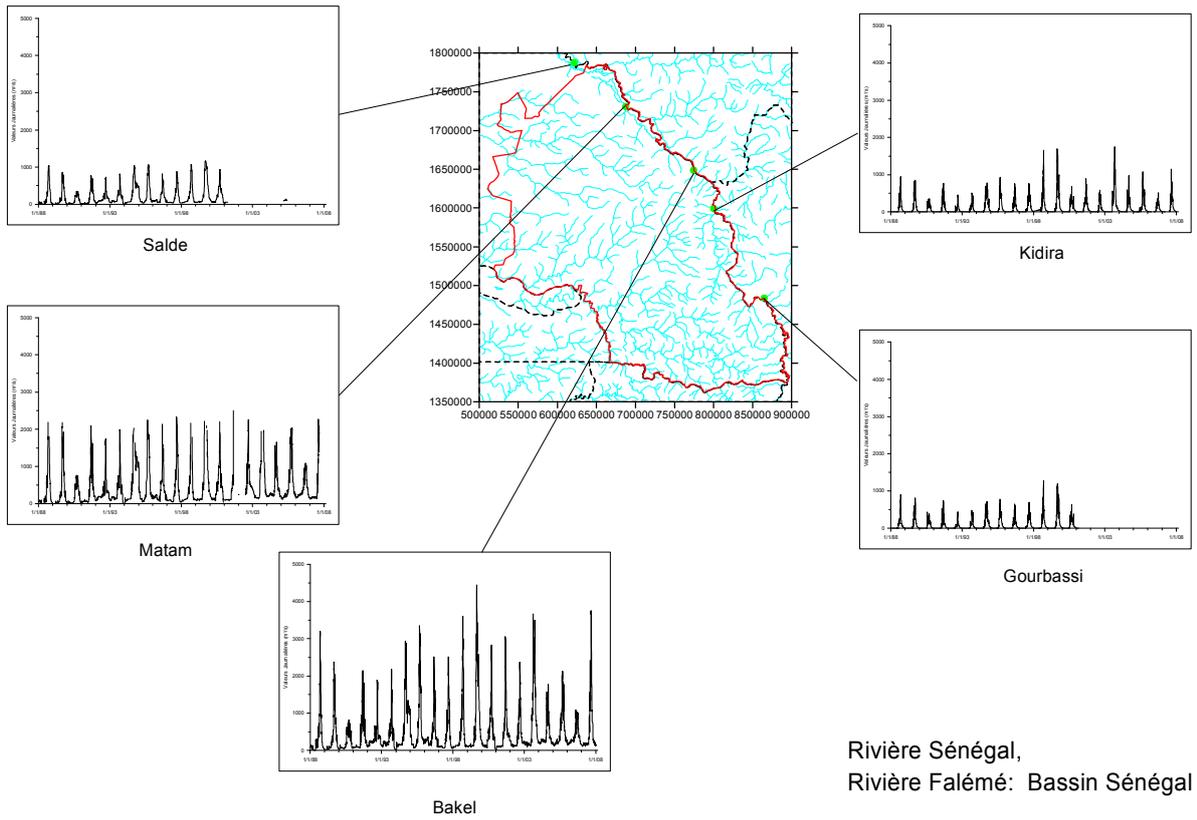


Figure 3-2-20 Carte de variation du débit des cours d'eau (Fleuve Sénégal)

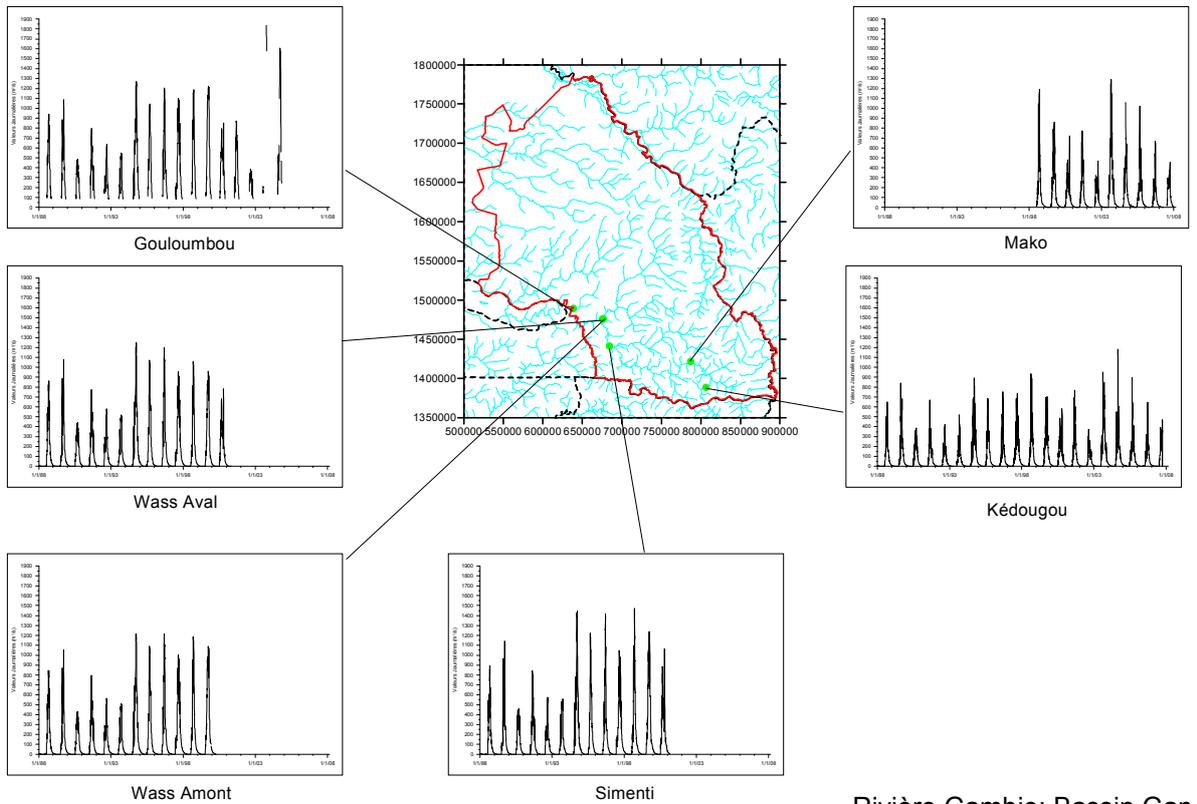


Figure 3-2-21 Carte de variation du débit des cours d'eau (Fleuve Gambie)

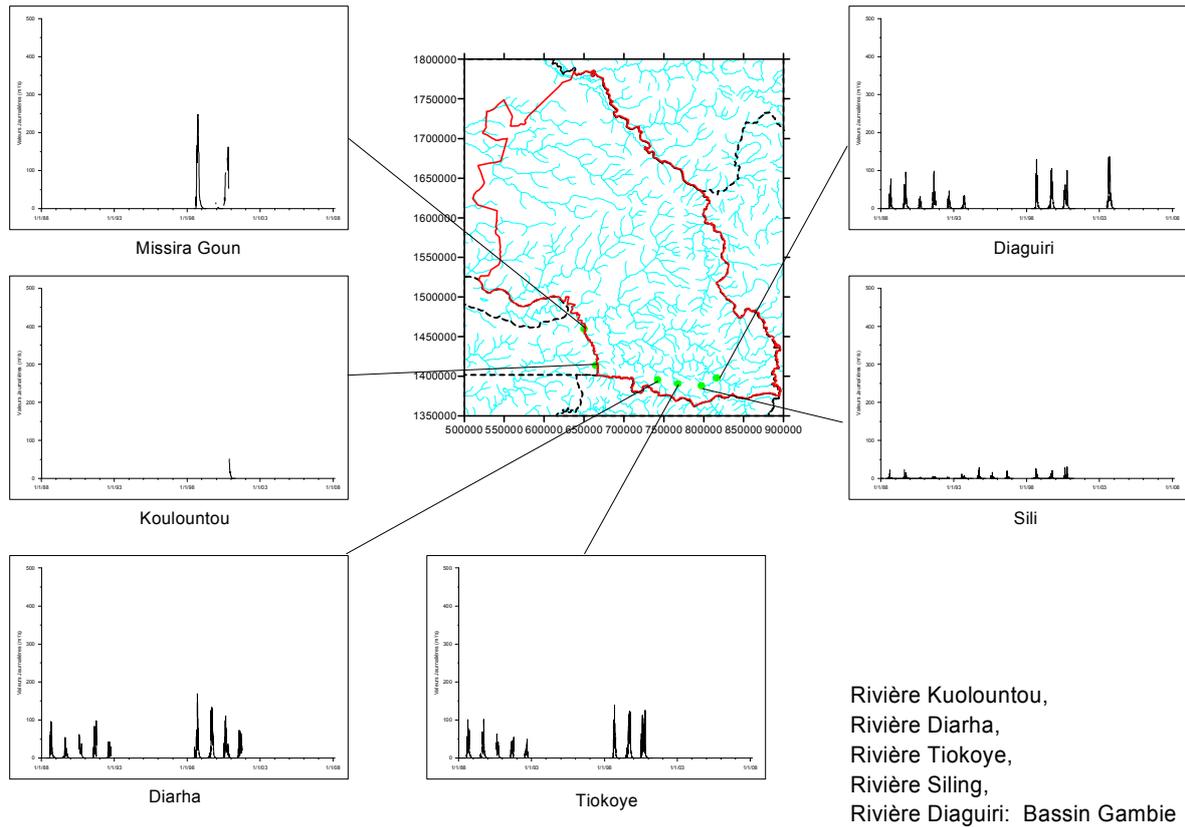


Figure 3-2-22 Carte de variation du débit des cours d'eau (Fleuve Gambie, affluent 1)

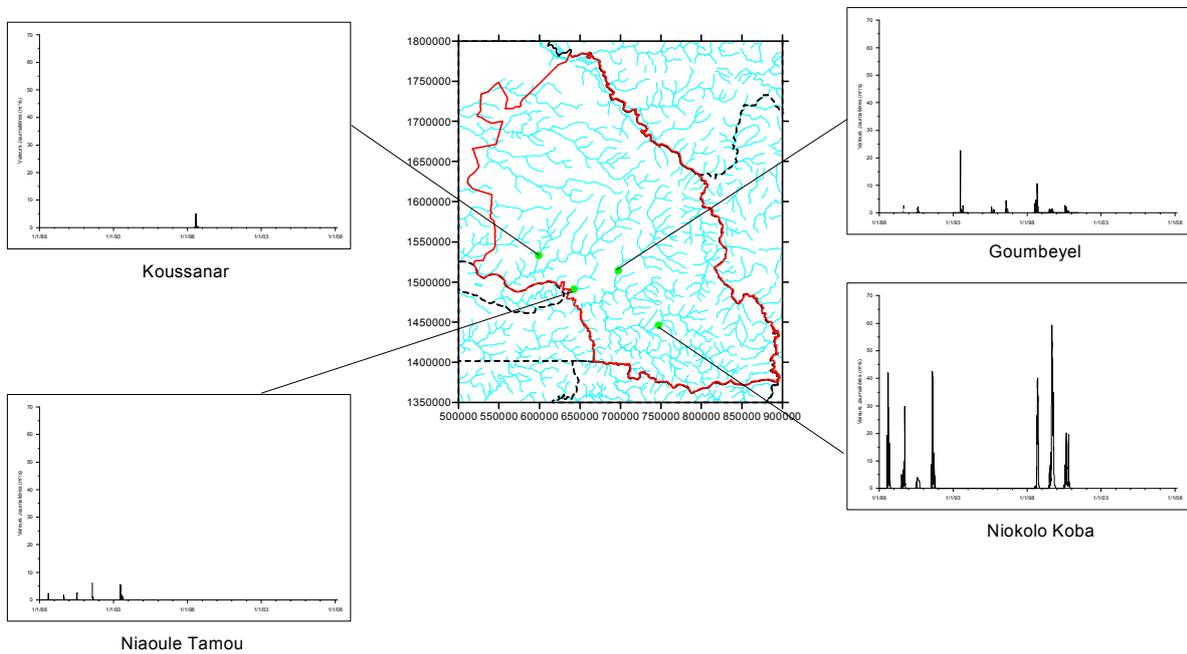


Figure 3-2-23 Carte de variation du débit des cours d'eau (Fleuve Gambie, affluent 2)

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	

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)

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

Comme indiqué précédemment, la DGPRE 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).

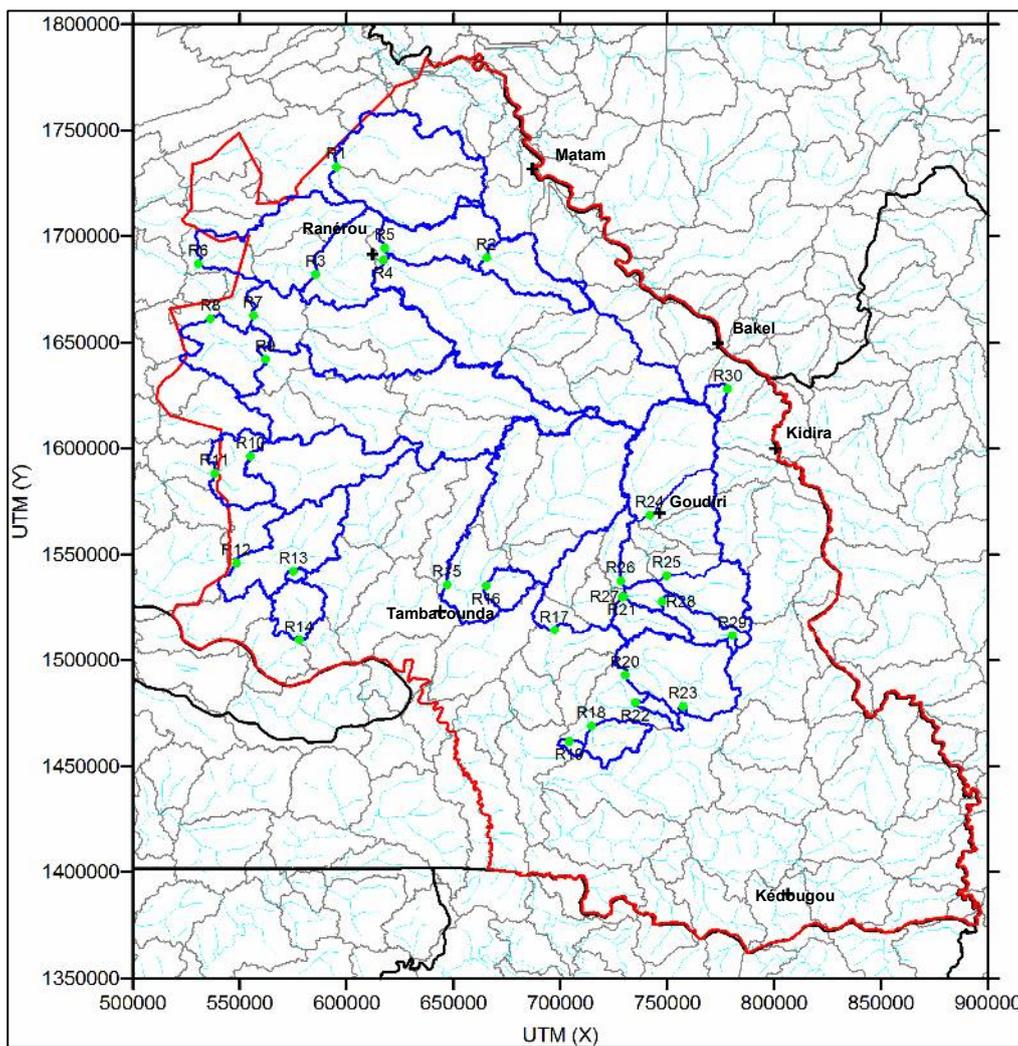


Figure 3-3-5 Carte de localisation des points de mesure du débit des cours d'eau

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.

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).

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.

(2) Etude de la qualité de l'eau

La pertinence de la division en zone indiquée au paragraphe (1) a été étudiée sur le plan de la qualité de l'eau. Les résultats de l'analyse d'ensemble utilisant les principaux ions (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO₃, SO₄) des eaux souterraines du Maastrichtien sont tels qu'indiqués ci-dessous (Figures 3-4-17~3-4-19). Chaque zone présente les caractéristiques propres comme suivants qui supportent la division en zone du paragraphe (1).

- Zone 1 : qualité de l'eau portant principalement sur le groupe 5
- Zone 2 : qualité de l'eau dont le groupe principal varie de 1 à 4, à 3 et à 6 en allant du nord au sud
- Zone 3 : qualité de l'eau portant principalement sur le groupe 8 à l'ouest, et le groupe 1 au sud-est
- Zone 4 : les points d'analyse étant peu nombreux, des groupes spécifiques n'ont pas pu être déterminés
- Zone 5 : qualité de l'eau portant principalement sur le groupe 3 en amont de Matam, et sur le groupe 1 en aval.

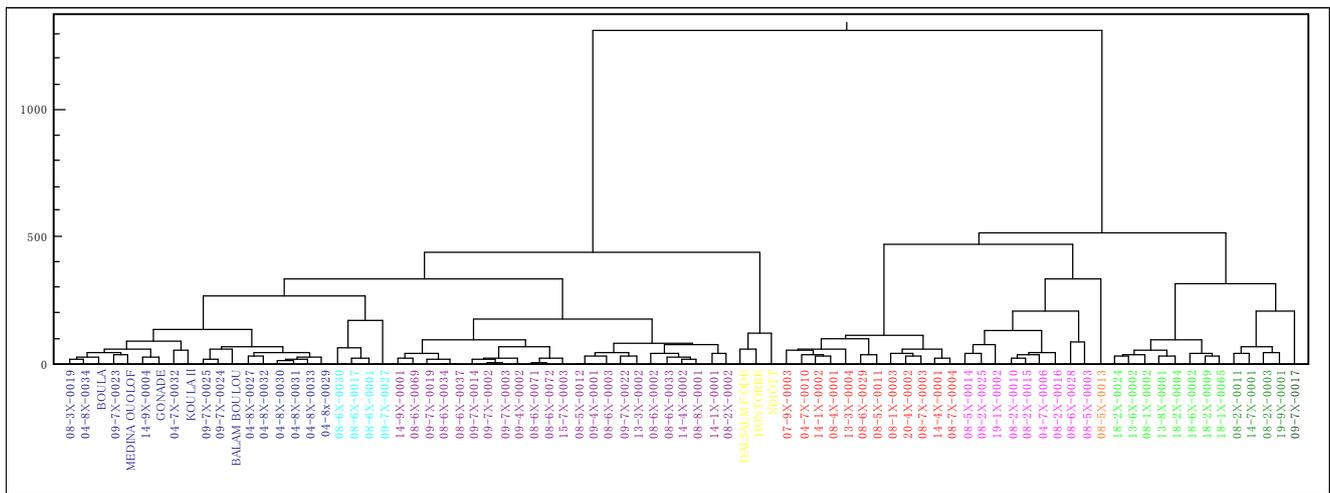


Figure 3-4-17 Résultats de l'analyse d'ensemble des principaux ions des eaux souterraines (arborescence)

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.