

a



Mlle Marième Soda DIALLO

# **Caractérisation hydrochimique des ressources en eau de la zone de Dindefello (Sénégal) : relation nappe cours d'eau, qualité des eaux**

*Mémoire présenté  
A l'Université internationale de langue française au service  
du développement*

***Université Senghor***

*Pour l'obtention de Master en Développement*

*DEPARTEMENT ENVIRONNEMENT  
SPECIALITE : GESTION DE L'ENVIRONNEMENT*

*ALEXANDRIE  
EGYPTE  
2007*



# UNIVERSITE SENGHOR

Université internationale de langue française au service du  
développement Africain

Promotion X

## **Département Gestion de l'Environnement**

Mémoire de fin d'étude

### **Caractérisation hydrochimique des ressources en eau de la zone de Dindefello (Sénégal) : relation nappe cours d'eau, qualité des eaux**

Présenté et soutenu le 24 mai 2007

Par

M<sup>LLE</sup> Marième Soda DIALLO

Jury :

Présidente : Dr. Caroline GALLEZ Université Senghor

Membres : Dr. Marcel BAGLO Administration territoriale, Bénin

: Pr. Jean Pierre REVERET Ecole des sciences de gestion  
L'UQAM Montréal



# *Dédicace*

*A ma famille*

## RESUME

Le village de Dindéfello est situé dans la communauté rurale de Bandafassi à 35 Km de la ville de Kédougou (Région de Tambacounda-Sénégal). Il est connu pour ses magnifiques chutes d'eau et sa diversité biologique qui attirent des milliers de touristes.

Dans l'optique de valorisation des ressources et face à la dynamique actuelle de fréquentation de ce site, il apparaît nécessaire pour la région d'avoir des connaissances approfondies sur la qualité des eaux.

La présente étude consiste à faire un diagnostique de la qualité actuelle des eaux du site. Notamment par une détermination de la qualité physico-chimique et bactériologique du principal cours d'eau qui le traverse, ainsi que celle de la nappe phréatique, ceci en fonction des différents usages des eaux, et par la détermination la relation qui existe entre la nappe phréatique et le cours d'eau en terme de transfert hydrique.

L'étude hydrochimique des eaux effectuée durant la période hivernale (août 2006) a été abordée par les mesures *in situ* des paramètres physico-chimiques, l'analyse au laboratoire des éléments majeurs (anions et cations) et éléments traces (les métaux), ainsi que la bactériologie. Elle a permis de montrer que les eaux de Dindéfello sont d'une manière générale acides (donc agressives), voire très acides dans la partie amont du cours d'eau. En aval, elles deviennent légèrement acides à neutres. La minéralisation est très faible dans le cours d'eau et moyennement faible dans la nappe et est dominée par les faciès bicarbonatés. Cette minéralisation est liée principalement à la dissociation du CO<sub>2</sub>, à l'hydrolyse des minéraux silicatés, à des apports météoriques et aux phénomènes d'échanges de bases. Les activités anthropiques sont responsables de l'élévation de la minéralisation en certains endroits du cours d'eau.

De l'étude piézométrique, il ressort que l'alimentation de la nappe phréatique se fait dans une large mesure par les eaux de pluies. La relation entre le cours d'eau et cette nappe phréatique se traduit également par une recharge de celle-ci par le cours d'eau. Au cours de cette recharge, les écoulements se font suivant une direction Est-Ouest.

Les eaux du site présentent une bonne qualité minéralogique avec des teneurs en éléments chimiques en dessous des valeurs guides de l'OMS pour les eaux de boisson. Cependant, les analyses bactériologiques mettent en évidence une pollution fécale importante les rendant impropres à la consommation humaine.

**Mots clés** : Hydrochimie, Qualité, Eau,



participent à des circuits organisés par de petites agences sénégalaises et des tours opérateurs étrangers (Nouvelles Frontières, Bassari Rutas) avec passage « obligé » à Dindefello.....	26
Les individuels et clients des petites agences sénégalaises ne dorment généralement pas à Dindefello. Ils se rendent sur le site la journée et retournent à Kédougou où ils sont hébergés. Mais c'est une clientèle qui demeure intéressante puisqu'elle consomme en repas et boisson et paie le droit de visite à la cascade.....	26
Durant la saison des pluies viennent essentiellement des Espagnols et des Italiens ; le reste de l'année ce sont surtout les Français et Belges qui se rendent sur le site et plus rarement quelques autochtones venus de différentes régions du pays.....	27
III-3 APPROVISIONNEMENT EN EAU.....	29
III-3-1 Les puits.....	29
III-3-2 Les forages.....	29
III-3-3 Le cours d'eau.....	29
III-4 Conclusion :.....	29
CHAPITRE IV : METHOLOGIE.....	31
IV.1 Acquisition des données .....	31
IV.1.1 Recherches bibliographiques .....	31
IV.1.2 Travaux de terrain.....	31
IV.1.3 Travaux de laboratoire.....	32
IV.2 Traitement des données.....	35
IV.2.1 Cartes géologiques et hydrogéologiques.....	35
IV.2.2 Cartographie de paramètres hydrogéochimiques.....	35
IV.2.3 Diagrammes d'interprétation.....	35
CHAPITRE V : PRESENTATION DES RESULTATS.....	38
V.1 paramètres physiques des eaux du cours d'eau.....	38
V.1.1 Température.....	38
V.1.2 pH.....	39
V.1.2 Conductivité.....	39
V.2 Paramètres chimiques des eaux du cours d'eau.....	40
V.2.1 Faciès géochimiques.....	40
V.2.2 Les éléments majeurs.....	41
V.2.3 Eléments mineurs et traces.....	45
V.4 Paramètres chimiques organiques : DBO et DCO.....	45
V.5 Bactériologie.....	46
V.6 Paramètres physiques des eaux de la nappe.....	46
V.6.1 Température.....	46
V.6.2 pH.....	47
V.6.3 Conductivité.....	47
V.7 Paramètres chimiques de la nappe.....	50
V.7.1 Faciès géochimiques des eaux de la nappe.....	50
V.7.2 Les éléments majeurs.....	50
V.7.3 Eléments traces et mineurs.....	52
V.8 Piézométrie et Relation Nappe/Cours d'eau.....	54
V.8.1 Bathymétrie de la surface de la nappe.....	54
V.8.2 Distribution spatiale des niveaux piézométriques de la nappe.....	54
V.9 Bactériologie.....	56
CHAPITRE VI : DISCUSSIONS.....	58
VI.1 Origine de la minéralisation des eaux.....	58
Comportement des eaux dans le diagramme de Chadha.....	59
VI.2 Usages et qualité des eaux.....	62

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS .....	68
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	76
Annexe 1 : Climatologie.....	79
Annexe II.1 : Paramètres physico-chimiques des eaux du cours d'eau (août 2006).....	80
Annexe II.2 : paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe (août 2006).....	80
Annexe II.3 : Paramètres chimiques (mg/l) des eaux du cours d'eau : août 2006.....	81
Annexe II. 4 : Paramètres chimiques (mg/l) des eaux de la nappe : août 2006.....	81
Annexe III.1: Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe (mai 2004).....	83
Annexe III.2 : Paramètres physico-chimiques des eaux du cours d'eau (mai 2004).....	83
Annexe III.3 : Paramètres chimiques (mg/l) des eaux du cours d'eau : mai 2004.....	84
Annexe III.4 : Paramètres chimiques (mg/l) des eaux de la nappe (mai 2004).....	84
Annexe VI.1 : Rapport hydrochimiques et indices d'échanges de bases (cours d'eau).....	85
Annexe IV.2 : Rapports hydrochimiques et indices d'échanges de bases (nappe).....	86
ANNEXE.V (a) faciès géochimiques des eaux du cours d'eau en saison sèche (mai 2004)....	87
ANNEXE V (b) faciès géochimiques des eaux de la nappe en saison sèche (mai 2004).....	87
Annexe VI.1 : Matrice de corrélation des eaux du cours d'eau.....	88
Annexe VI.2 : Matrice de corrélation des eaux de la nappe.....	88
Annexe VII : variations de la profondeur de la nappe en fonction des saions.....	89

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.....	3
Figure 2 : Pluviométrie moyenne mensuelles à Kédougou de 1970 à 2000.....	7
Figure 3 : Températures moyennes mensuelles à Kédougou de 1970 à 2000.....	8
Figure 4 : Moyennes mensuelles de l'évaporation à Kédougou de 1970 à 2000.....	9
Figure 5 : Moyennes mensuelles de l'humidité relative à Kédougou de 1970 à 2000.....	10
Figure 6 : Moyennes mensuelles de l'insolation à Kédougou de 1970 à 2000.....	10
Figure 7 : Le craton Ouest Africain.....	12
Figure 8 : Bassin sédimentaire de Madina-Kouta.....	15
Figure 9 : Stratigraphie du groupe de Ségou.....	17
Figure 10 : Esquisse géologique du Sénégal Oriental.....	19
Figure 11 : Aquifères des zones de socle.....	24
Figure 12 : Diagramme de fréquentation du site de Dindéfello.....	27
Figure 13 : Evolution des recettes du campement (2001 et 2002).....	28
Figure 14 : Carte de localisation des points d'eau échantillonnés.....	34
Figure 15 : Diagramme de Chadha.....	37
Figure 16 : Variation de la température de l'eau le long du cours d'eau.....	38
Figure 17 : Variation du pH le long du cours d'eau.....	39
Figure 18 : Variation de la conductivité le long du cours d'eau.....	30
Figure 19 : Diagramme de Piper des eaux du cours d'eau (août 2006).....	41
Figure 20 : Variation des éléments chimiques le long du cours d'eau (saison sèche).....	43
Figure 21 : Variation des éléments chimiques le long du cours d'eau (hivernage).....	44
Figure 22 : Distribution spatiale de la température des eaux de la nappe.....	48
Figure 23 : Distribution spatiale de pH des eaux de la nappe.....	48
Figure 24 : Distribution spatiale de la conductivité des eaux de la nappe.....	49
Figure 25 : Diagramme de Piper des eaux de la nappe.....	50
Figure 26 : Diagramme binaire ions $\text{HCO}_3^-$ /conductivité de la nappe.....	53
Figure 27 : Diagramme binaire ions $\text{Ca}^{2+}$ /conductivité des eaux de la nappe.....	53
Figure 28 : Variation spatiale des niveaux statiques (m) de la nappe.....	55
Figure 29 : Variation spatiale du niveau piézométrique (m) de la nappe.....	55
Figure 30 : Variation spatiale de la minéralisation totale des eaux de la nappe.....	56
Figure 31 : Diagramme de Chadha : processus de minéralisation des eaux du cours d'eau	60
Figure 32 : Diagramme de Chadha : processus de minéralisation des eaux de la nappe....	60

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques des eaux du cours d'eau.....	38
Tableau 2 : Teneurs en ions (m/l) des eaux du cours d'eau (Saison des pluies) .....	42
Tableau 3 : Concentrations en éléments mineurs et traces dans le cours d'eau.....	45
Tableau 4 : DBO5 et DCO des eaux du cours d'eau.....	46
Tableau 5 : Teneurs en germes indicateurs de la pollution fécale cours d'eau .....	46
Tableau 6 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe.....	46
Tableau 7 : Teneurs en ions majeurs (mg/l) de la nappe (Saison des pluies 2006).....	50
Tableau 8 : Concentrations en éléments mineurs et traces dans la nappe.....	52
Tableau 9 : Teneurs en germes indicateurs de la pollution fécales dans la nappe.....	57
Tableau 10 : Cours d'eau et critères de conformité des eaux de baignade (directive 76/160/CEE du 8 décembre 1975).....	63
Tableau 11 : Normes de qualité OMS et ions majeurs des eaux du cours d'eau .....	65
Tableau 12 : Normes de qualité OMS et ions majeurs des eaux de la nappe.....	65
Tableau 13 : Directives OMS et qualité microbiologique des eaux .....	67

## SIGLES ET ACRONYMES

**ASECNA** : Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et Madagascar

**ARD** : Agence Régionale de Développement

**BRGM** : Bureau Régional de la Recherche Géologique et Minière

**CEAO** : Communauté Economique de l’Afrique de l’Ouest

**CEE** : Communauté Economique Européenne

**CEFIGRE** : Centre de Formation Internationale en Gestion des Ressources en eau

**DTGC** : Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques

**DBO** : Demande Biochimique en Oxygène

**DCO** : Demande Chimique en Oxygène

**ESP** : Ecole Polytechnique Supérieure

**GIE** : Groupement d’Intérêt Economique

**OMS** : Organisation mondiale de la santé

**PIC** : Plan d’Investissement communal

**PRDI** : Plan Régional de Développement Intégré

**SODEFITEX** : Société de Développement de Fibres Textiles

**TAC** : Titre Alcalimétrique Complet

**UCAD** : Université Cheikh Anta DIOP

## AVANT-PROPOS

Ce travail que nous venons d’achever a été réalisé dans le cadre du Programme Régional de Développement Intégré de la région de Tambacounda.

La loi portant sur la décentralisation adoptée par le gouvernement du Sénégal en janvier 1996 a érigé la région en collectivité locale, personne morale de droit public, dotée d’un organe délibérant et d’un organe exécutif. Les décrets d’application de cette loi ont investi la région

d'importantes compétences de développement dont la planification. La région constitue aujourd'hui le cadre de planification, de programmation de développement économique, social et culturel et l'espace de coordination entre l'Etat, les acteurs du développement et les collectivités de base.

Dans ce contexte institutionnel favorable, le Conseil Régional de Tambacounda a pris la décision de réaliser à partir de 1999, le Plan Régional de Développement Intégré (PRDI). Le PRDI est donc un outil de pilotage et d'orientation, un cadre de référence des interventions de tous les acteurs. Il est mis en cohérence avec les orientations stratégiques nationales et intègre de façon globale les Objectifs du Millénaire pour le Développement. Ce plan né de la volonté des autorités locales de développer la région, établit un bilan diagnostique de la situation socioéconomique et fixe les grandes orientations stratégiques de développement. Il a été retenu que le pivot de ce plan sera incontestablement l'environnement et la gestion des ressources naturelles en intégrant les autres composantes socioéconomiques, culturelles et d'appui à la production qui seront des éléments de l'espace aménagé « Environnement et gestion équilibrée des ressources naturelles ».

C'est dans cette logique de valorisation des énormes potentialités dont dispose la région de Tambacounda, que s'inscrit cette étude sur le village de Dindéfello qui constitue avec le parc de Niokolo Koba la première destination touristique de la région. Cette étude porte essentiellement sur les ressources en eau de ce site, et fait un diagnostique de leur qualité.

## REMRCIEMENTS

Ce travail a été financé par l'**ARD** (Agence Régionale de Développement) de Tambacounda et l'**Université Senghor** : Université Internationale de langue française au service de développement. Avant d'exposer mes travaux qui ont aboutis à la rédaction de ce mémoire, je teins à remercier les personnes qui ont permis sa réalisation.

Docteur **Caroline Gallez**, Directrice du Département Environnement pour m'avoir accueillie au sein de son département et pour avoir créer les conditions favorables au

déroulement de ma formation en Gestion de l'Environnement. Je la remercie également pour sa participation au jury.

Les membres du jury **M Jean Pierre REVERET** et **M Marcel BAGLO** pour avoir accepté de juger ce travail.

Monsieur **Michel Radoux**, du groupe de recherche MHEA de l'Université de Liège, pour avoir accepté avec gentillesse de corriger ce travail et pour ses remarques pertinentes qui m'ont servies à l'améliorer.

Je remercie également Monsieur **Aboul Aziz TANDIA**, Directeur de l'ARD de Tambacounda pour la confiance qu'il m'a portée en me confiant ce travail ainsi que tous les agents de l'ARD et du Conseil Régional de Tambacounda.

Mes remerciements vont également à l'endroit de :

Monsieur **Kalidou CISSOKHO**, Chef de l'antenne départementale de l'ARD de Kédougou qui a tout mis en œuvre pour que les missions d'échantillonnage se déroulent dans de bonnes conditions.

Un grand merci à tous les habitants du village de Dindéfello en particulier Balla TOURE et les jeunes guides du campement villageois qui se sont tous investis sur le terrain lors des missions d'échantillonnage notamment pour le transport du matériel

Messieurs **Insa DIA** et **Ibrahima DEME** doctorants à l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar pour leur aide précieuse sur le terrain.

Madame **Dinora DEBAROS**, Maître Assistant au département de chimie de l'université Cheikh Anta DIOP de Dakar sans qui je n'aurais pas eu le courage de faire des études universitaires.

Monsieur **HASSANE EZEDINE** grâce à qui j'ai pu venir à Senghor

Un très grand merci à l'ensemble des auditeurs de la promotion X, particulièrement à ceux de l'Environnement pour l'esprit de fraternité et d'amitié qu'ils ont mis en place tout le long de la formation.

Je remercie plus personnellement M. **MAGOUMBALA NGOAYA Wenceslas Le Parfait**.

## INTRODUCTION

Au sud-est du Sénégal à quelques kilomètres de la frontière guinéenne, se trouve un petit village du nom de Dindéfello qui a la chance de voir surgir de la montagne qui la surplombe une source d'eau limpide qui se déverse en cascade le long de cette dernière.

L'escarpement que dévale cette cascade présente de nombreux attraits, notamment, une mosaïque d'écosystèmes dont un ensemble remarquable de forêts galeries, une avifaune très diversifiée ainsi qu'une population importante de Chimpanzés. Ce paysage rare à la beauté indéniable dont la cascade apparaît emblématique, confère au site et à la communauté dont elle appartient une valeur patrimoniale à préserver. La beauté de ce minuscule village et sa diversité biologique résultent de la présence de l'unique cours d'eau permanent qui se trouve en aval de la cascade. Du fait de sa diversité biologique, le site de Dindéfello attire chaque année des centaines voire des milliers de touristes qui en ont fait un lieu de baignade et de pique nique.

Par ailleurs, aussi bien au niveau de la cascade que tout au long du cours d'eau, les populations locales développent des activités domestiques telles que baignade, lavage, lessive etc. Ainsi des quantités importantes de détergents et de déchets divers sont quotidiennement rejetées dans le cours d'eau, ce qui peut d'une part, affecter sa qualité et celle de la nappe phréatique et d'autre part, provoquer à long terme des problèmes de santé publique ainsi qu'un déséquilibre écologique.

On note également que l'approvisionnement en eau de boisson des populations de Dindéfello repose essentiellement sur l'exploitation du cours d'eau (surtout en période d'étiage où les puits sont à sec) et de la nappe phréatique.

Vu l'importance de l'utilisation des ressources en eau du site, et en raison du manque de données sur leur qualité, les autorités locales nous ont proposé de réaliser cette étude. Elle s'inscrit dans le cadre du Programme Régional de Développement Intégré de la région de Tambacounda. Programme dont l'objectif est de promouvoir le développement économique, social et culturel, l'amélioration de la croissance économique et la protection de l'environnement et des ressources naturelles.

Cette étude a pour principaux objectifs :

- de déterminer la qualité chimique et bactériologique du cours d'eau en terme de faciès géochimiques et en termes de potabilité par rapport aux normes internationales de qualité des eaux destinées à la consommation humaine ;
- d'étudier les variations spatiales et temporelles de la qualité le long du cours d'eau et au niveau de la nappe ;

- d'étudier les interrelations piézométriques et chimiques pouvant exister entre la nappe et le cours d'eau
- proposer des solutions en vue d'une bonne gestion de la qualité des eaux du site.

Ce travail comprend deux parties :

la première partie traite de généralités sur le milieu d'étude et comprend trois chapitres :

- **le chapitre I** qui présente le cadre physique de la zone d'étude notamment sa situation géographique et les aspects climatiques ;
- **le chapitre II** présente le cadre géologique en décrivant la structure lithostratigraphique des formations ; et hydrogéologique en faisant un inventaire des aquifères de la zone ; ainsi qu'une description du réseau hydrographique ;
- **le chapitre III** présente l'environnement socio-économique

la deuxième partie du travail fait une caractérisation hydrochimique des eaux et étudie leur qualité en fonction des différents usages. Elle comprend trois chapitres :

- **le chapitre IV** concerne la méthodologie de l'étude sur le terrain et en laboratoire pour la collecte des données et expose les différentes méthodes de traitement de ces données ;
- **le chapitre V** présente les résultats
- **le chapitre VI** présente l'interprétation des résultats, les conclusions générales ainsi que les recommandations.

**PREMIERE PARTIE : GENERALITES SUR  
LE MILIEU D'ETUDE**



## CHAPITRE I : CADRE PHYSIQUE DE L'ETUDE

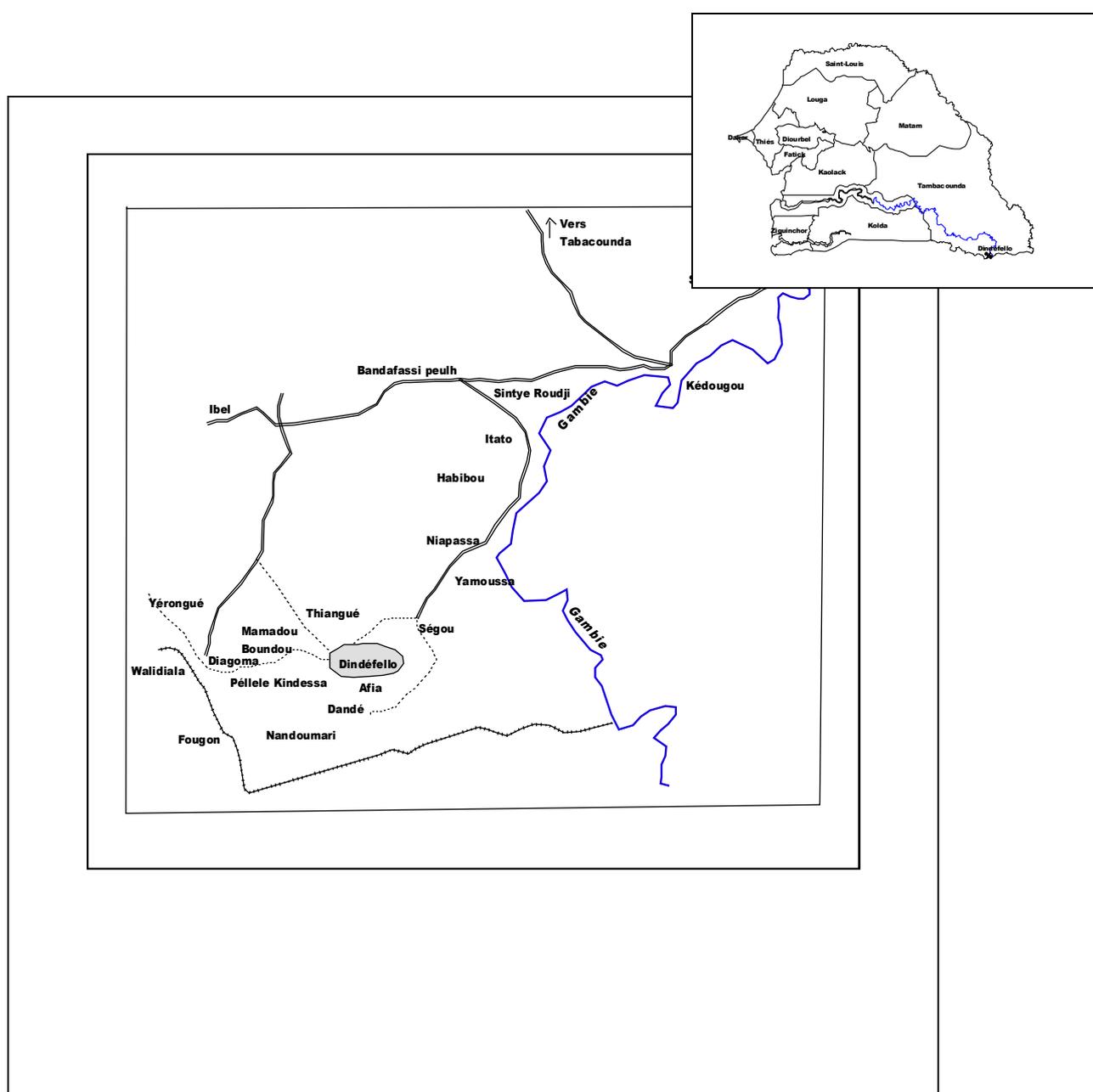
### I-1 Situation géographique

Le site de Dindéfello est situé au sud-est du Sénégal dans la région de Tambacounda (département de Kédougou, arrondissement de Bandafassi), à 35 Km de la ville de Kédougou.

Il est situé entre les villages de Tiangué, Dandé, Ségou et Mamadou Boundou (**fig. 1**).

C'est un village localisé en contrebas d'un plateau appartenant aux contreforts du mont Fouta Djalou.

**Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.**



## **I-2 Le relief**

La région du Sénégal oriental est formée de vastes étendues aplanies dominées localement par des buttes cuirassées. Ces surfaces sont souvent couvertes par un épais manteau latéritique, cuirassé ou non, qui masque les formations géologiques originelles.

A Dindéfello, on rencontre deux unités structurales : une vaste plaine correspondant au socle ancien sur lequel est établi le village ; et le bassin sédimentaire de Madina-kouta qui forme un plateau d'environ 400 m d'altitude se prolongeant bien au delà de la frontière guinéenne au Sud.

## **I-3 Les sols et la végétation**

### **I-3-1 Les sols**

Les sols sont assez variés et fonctionnent de la topographie et de l'hydrographie. On distingue cinq types de sols (GOUDIABY *et al*, 1992) :

- sur le plateau : les sols sableux (Ndiaré), les sols sablo-argileux (Katamanna), les sols rocheux, cuirasse (Fétééré), les bowé (Bowé) ;
- dans les bas-fonds s'individualisent les sols hydromorphes ou Parawol.

#### **I-3-1-1 Les sols sableux**

Ils appartiennent au groupe des sols ferrugineux tropicaux lessivés. Ces sols sont actuellement pauvres du fait des cultures répétées d'arachide et de mil.

#### **I-3-1-2 Les sols argilo sableux**

Ces sols se localisent près des bas-fonds et font suite aux sols sableux. Ce sont des sols plus sombres que les sols beiges et sont une transition vers les sols hydromorphes des bas-fonds. Ces sols ferrugineux tropicaux lessivés supportent bien les cultures d'arachide.

#### **I-3-1-3 Les sols gravillonnaires**

Ils sont de faible extension (limitée à la croûte superficielle) et pauvres en matières organiques. Le défrichement de la couverture végétale qui les protégeait fait qu'ils sont exposés à l'érosion hydrique entraînant une dégradation souvent très avancée.

#### **I-3-1-4 Les Bowé**

Les Bowé représentent les parties où affleure la cuirasse ferrugineuse. Cette cuirasse se présente sous forme de dalles latéritiques ou de gros blocs. Les Bowé ne sont pas cultivés et sont occupés par des formations forestières composées d'espèces ligneuses.

### **I-3-1-5 Les sols hydromorphes**

Ce sont les sols des bas-fonds localisés sur des matériaux alluviaux et/ou colluviaux. Ce sont des sols à pseudogley. Il s'agit de sols noirs caractérisés par une alternance de phases d'oxydation et de réduction. Leur hydromorphie est provoquée par la stagnation des eaux de pluies et par la proximité de la nappe phréatique.

La plupart de ces types de sols présente actuellement une évolution régressive du fait de la culture de l'arachide pratiquée depuis des décennies et qui a entraîné une baisse de leurs potentialités.

### **I-3-2 La végétation**

Les types de végétations les plus fréquentes sont :

La forêt galerie : occupe les bas-fonds où les conditions pédologiques et hydrologiques sont très favorables. C'est une forêt dense avec de grands arbres. La végétation de la cascade se caractérise par la richesse de sa composition floristique marquée par la prédominance des espèces à affinité guinéenne.

Plusieurs espèces observées à Dindéfello n'ont jamais été rencontrées dans les sites prospectés par les botanistes au Sénégal (GOUDIABY *et al.*, 1992). C'est le cas de la liane *Pararistolochia galdieana* et *Euphorbia poissoni*.

Sur les parois de la falaise on a dénombré huit espèces de fougères : *Adiantum philippense*, *Adiantum schweinfurtii*, *Bolbitis acrostichoides*, *Bolbitis heudelotii*, *Dryopteris gongylodes*, *Pteris linearis*, *Trichomanes mannii*, *Isoetes scheweinfurtii*.

Cependant depuis quelques années on remarque une diminution du nombre des grands arbres sur l'étage dominant, une modification de la physionomie des fougères et un éclaircissement de la strate inférieure.

Les zones de savane : ici on rencontre des espèces à affinité soudanienne.

Les espèces dominantes sont : *Terminalia macroptera*, *Pilostigma thonningii*, *Combretum glutinosum*, *Strychos spinosa*, *Hymenocardia acida*, *Gardenia triacantha*, *Annona senegalensis*, *Ostryoderris stuhlmanii*, *Guiera senegalensis*, *Butyrospermum parkii* (GOUDIABY *et al.*, 1992)

La forêt claire : composée d'assez grands arbres à cimes parfois peu espacées ce qui permet l'installation d'une strate herbacée utilisée par le bétail et qui sert de combustible pour les feux de brousse. Les essences soudanienne dominantes sont mélangées à des espèces

guinéennes. On y rencontre : *Terminalia macroptera*, *Piliostigma thonningii*, *Annana senegalensis*, ...

Actuellement on assiste à une dégradation de la végétation dans certaines zones du terroir. Elle est par ailleurs souvent ravagée par des feux de brousse ce qui rend difficile la gestion des ressources végétales.

On note en outre une dégradation des sols et une baisse de la composition floristique du fait principalement de facteurs anthropiques.

#### **I-4 Climatologie**

Le manque de données précises sur le site de Dindéfello nous oblige à nous référer à la station de Kédougou qui se trouve être la plus proche, pour caractériser le climat.

Du fait de la situation géographique du département de Kédougou, le climat est de type soudano-guinéen.

##### **I-4-1 Les vents**

Le Sénégal est caractérisé d'une manière générale par deux types de vents : l'Harmattan, vent chaud et sec (en raison de son long parcours continental), en provenance de l'anticyclone sahélien, et la mousson chaud et humide issu de l'anticyclone de Sainte Hélène. La trace au sol de la limite de la mousson et de l'Harmattan constitue le Front Intertropical (FIT) ou équateur météorique.

Durant la saison sèche, l'anticyclone continental boréal centré sur le Sahara et l'anticyclone des Açores sont très puissants et repoussent l'équateur météorologique vers le Sud. Cette position méridionale est souvent atteinte en décembre-janvier. L'anticyclone saharien envoie vers les basses latitudes un flux d'air fort et régulier, l'harmattan de direction NE. Il est responsable des températures élevées et des forts taux d'évaporation existant sur la majorité du territoire sénégalais (STANCIOF et al, 1986). L'harmattan rencontre au niveau de la côte l'alizé maritime engendré par l'anticyclone des Açores, vent intermittent apportant brouillard et fraîcheur et parfois même des pluies occasionnelles (heug en wolof), (MICHEL, 1973).

En février, le F.I.T amorce sa migration vers le nord où il atteint et franchit le 13 ° parallèle en mai-juin. Cette migration est due au renforcement de l'anticyclone subtropical de Sainte Hélène qui souffle les masses d'air océaniques, tièdes et humides sur la quasi-totalité de l'Afrique occidentale, provoquant les averses de la saison des pluies. En août, le F.I.T atteint sa position la plus septentrionale vers 20° de latitude nord et dès le mois de septembre, cette ascension du F.I.T s'inverse pour une descente vers le Sud. La saison des pluies s'achève en octobre-novembre lorsque le F.I.T quitte le pays.

Du fait de sa continentalité le département de Kédougou ne subit pas les influences des alizés maritimes. L'Harmattan qui s'installe du mois de février au mois d'avril est remplacé dès le début du mois de mai par la mousson génératrice de pluies. Ces pluies sont souvent des orages pouvant dépasser 15 mètres/seconde (WACKERMAN, 1975).

#### I-4-2 Les précipitations

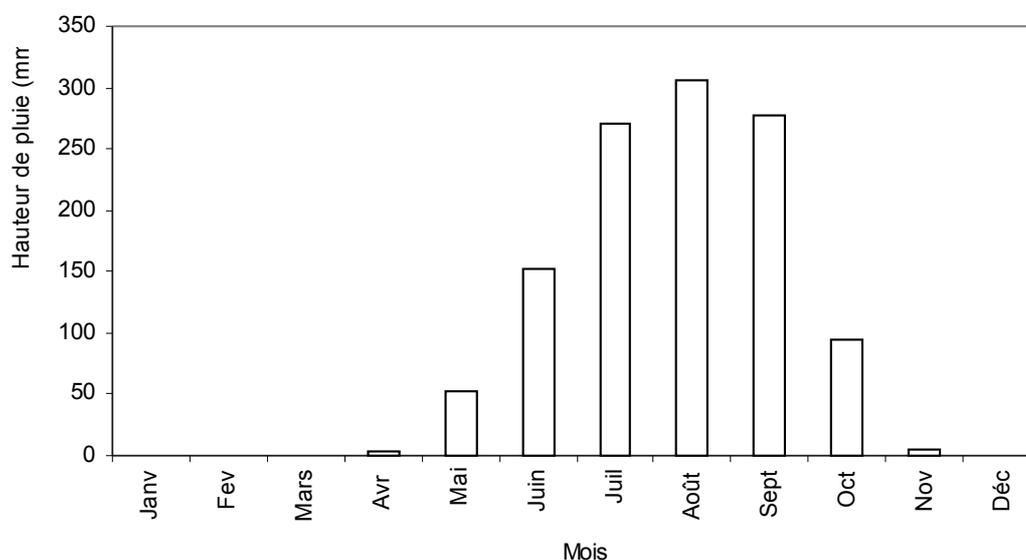
Situé entre les isohyètes 1000 et 1300 mm, le département de Kédougou est l'un des plus pluvieux du Sénégal avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1160 mm au cours de la période (1970 – 2000).

La situation pluviométrique au cours de l'année (**fig. 2**) révèle la présence de deux saisons :

- Une saison sèche qui s'étend de novembre à avril ;
- Une saison des pluies qui va de mai à octobre avec un maximum de 310 mm au mois d'août.

Les mois les plus arrosés sont les mois d'août et septembre avec des averses orageuses qui entraînent une dégradation et un lessivage important des sols, ce qui est en faveur du ruissellement. Par ailleurs, la pluviométrie varie d'une année à une autre. Exemple au cours de la période (1981-1994) on a compté six années de pluviométrie inférieure à 1000 mm (PIC Tamba, 1999). La saison des pluies peut débuter précocement ou au contraire très tardivement. Elle peut également être marquée par des arrêts de pluies de plusieurs semaines au cours de l'hivernage.

**Figure 2 : Pluviométrie moyenne mensuelle à Kédougou de 1970 à 2000 (Service de la météorologie nationale).**



### I-4-3 La température

Le département de Kédougou est caractérisé par une température moyenne annuelle assez élevée du fait de sa continentalité (28.5 °C de 1970 à 2000).

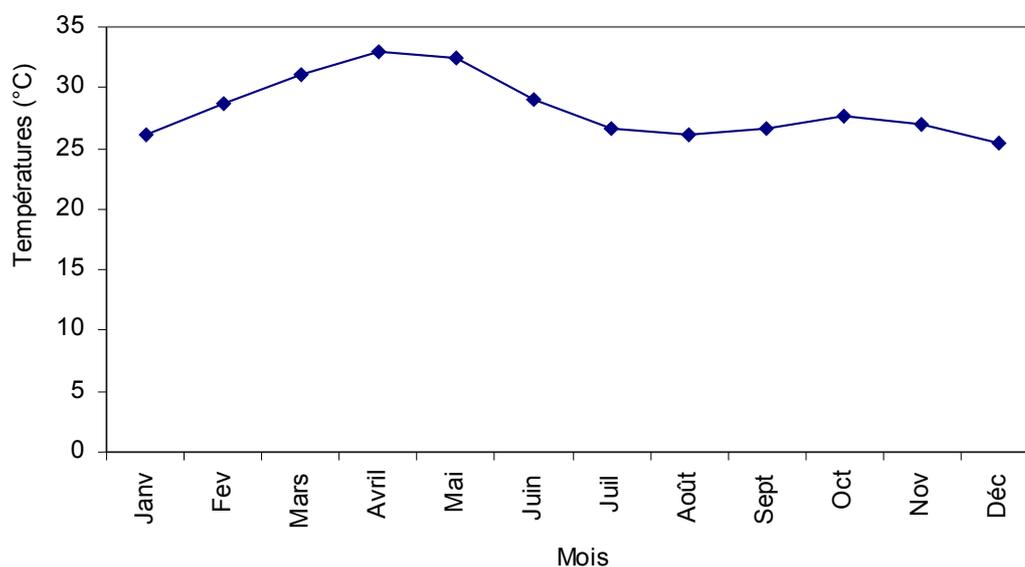
La **figure 3**, qui représente la variation mensuelle des températures moyennes journalières, montre que celles-ci sont très élevées entre les mois de Février et avril. Cette période de fortes températures coïncide avec la période de circulation de l'harmattan, vent chaud et sec.

Les températures baissent considérablement du mois de mai au mois de septembre avec un minimum de 25°C au mois d'août, période correspondant à la saison des pluies.

A la fin de l'hivernage, vers les mois d'octobre et de novembre, on note une légère augmentation des températures. Elles chutent par la suite et se maintiennent légèrement au dessus de 25°C jusqu'au mois de février.

A Dindéfello, la présence de la cascade entraîne l'installation d'un microclimat où les températures sont plus douces.

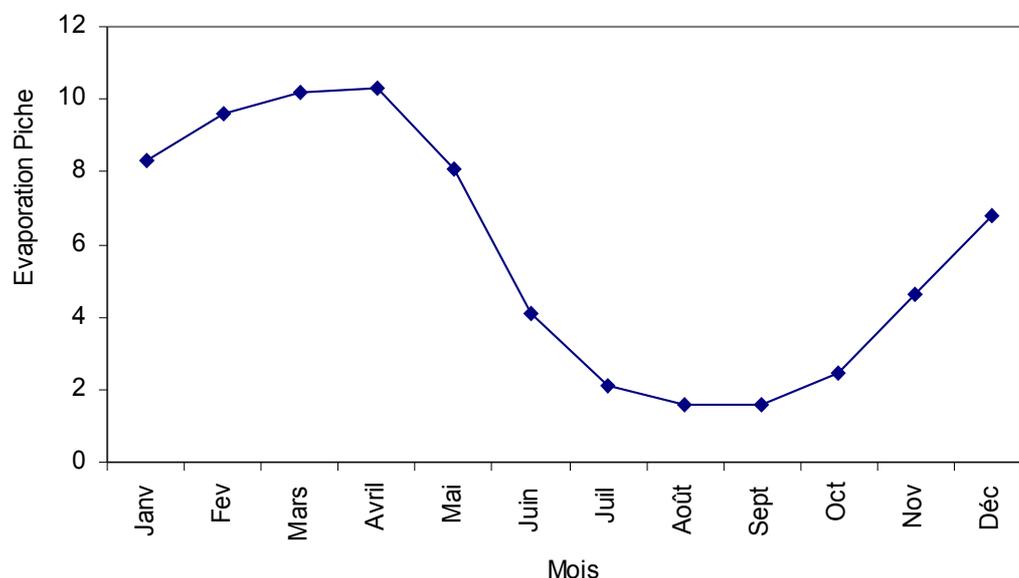
**Figure 3 : Températures moyennes mensuelles à Kédougou de 1970 à 2000 (Service de la météorologie nationale).**



### I-4-4 L'évaporation

L'évaporation (**fig. 4**) est forte pendant la saison sèche où elle atteint la valeur maximale de 10.3 mm au mois d'avril. Les moyennes mensuelles les plus élevées coïncident avec la période où souffle l'Harmattan (mars et avril). Elle diminue pendant la saison des pluies pour atteindre une valeur minimale de 1.8mm au mois d'août.

**Figure 4 : Moyennes mensuelles de l'évaporation Piche à Kédougou de 1970 à 2000 (Service de la météorologie nationale).**



#### **I-4-5 L'humidité relative**

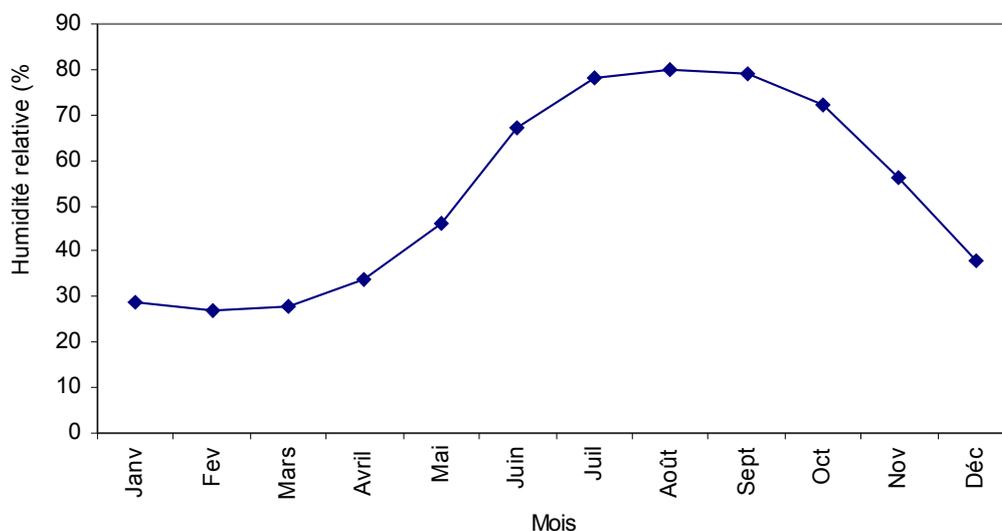
Par rapport au reste du pays, l'humidité relative est moindre dans le département de Kédougou avec une moyenne annuelle de 53.6 %. L'évolution des moyennes mensuelles entre 1970 et 2000 (**fig. 5**) montre que ce facteur est très faible pendant la saison sèche avec un minimum de 29 % au mois de février, période pendant laquelle soufflent les alizés continentaux chauds et secs. Elle augmente considérablement pendant la saison des pluies où elle atteint 80 % au mois d'août et décroît progressivement à la fin de la saison pluvieuse.

Ce facteur est en outre très influencé par la topographie et le biotope. Ainsi elle est plus importante dans les zones encaissées à végétation dense que dans les milieux plus ouverts où la température est plus élevée. Ce microclimat est très marqué à Dindéfello avec la présence de la cascade dont la brume humidifie l'air.

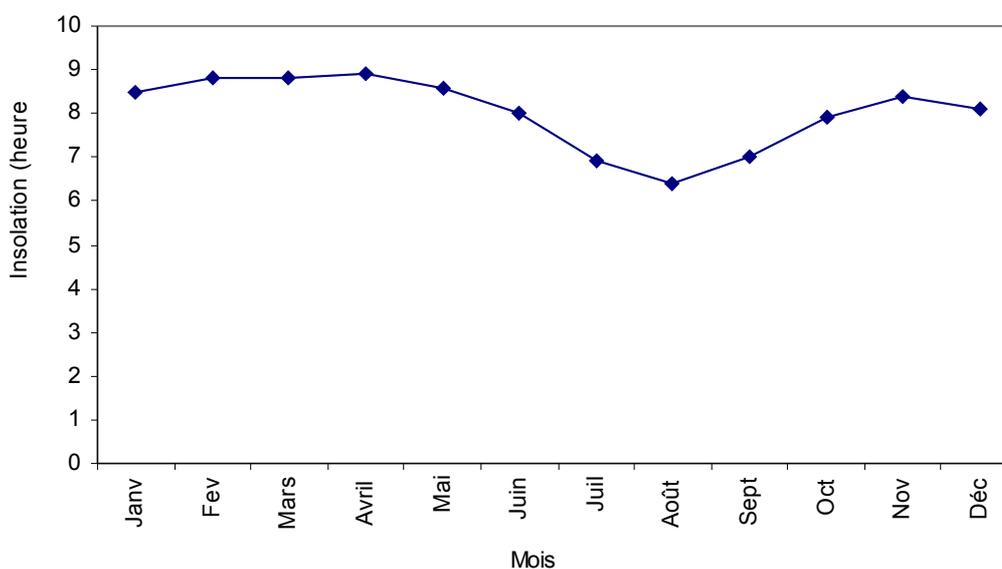
#### **I-4-6 L'insolation**

Le département de Kédougou est très ensoleillé avec une moyenne annuelle de 8.1h/j. Les valeurs les plus élevées sont observées pendant la saison sèche (**fig. 6**) où les températures sont très élevées et le ciel très dégagé. Les faibles valeurs s'observent entre juillet et septembre période correspondant à l'hivernage où le ciel est généralement couvert.

**Figure 5 : Moyennes mensuelles de l'humidité relative à Kdoukou de 1970 à 2000 (Service de la météorologie nationale).**



**Figure 6 : Moyennes mensuelles de l'insolation à Kédougou de 1970 à 2000 (service de la météorologie nationale).**



### **I-5 Conclusion :**

L'étude des paramètres climatiques a montré que l'année est divisée en deux saisons :

- une longue saison pluvieuse ;
- une saison chaude caractérisée par de fortes températures et une forte évaporation.

Cependant, dans le département de Kédougou, les pluies sont en général violentes et de courte durée ce qui favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration.

Par ailleurs, du fait de son éloignement par rapport à la côte, les écarts thermiques saisonniers et journaliers y sont très importants.

On note en outre une dégradation des sols et une baisse de la composition floristique du fait principalement de facteurs anthropiques.

## CHAPITRE II : GEOLOGIE ET RESSOURCES EN EAU

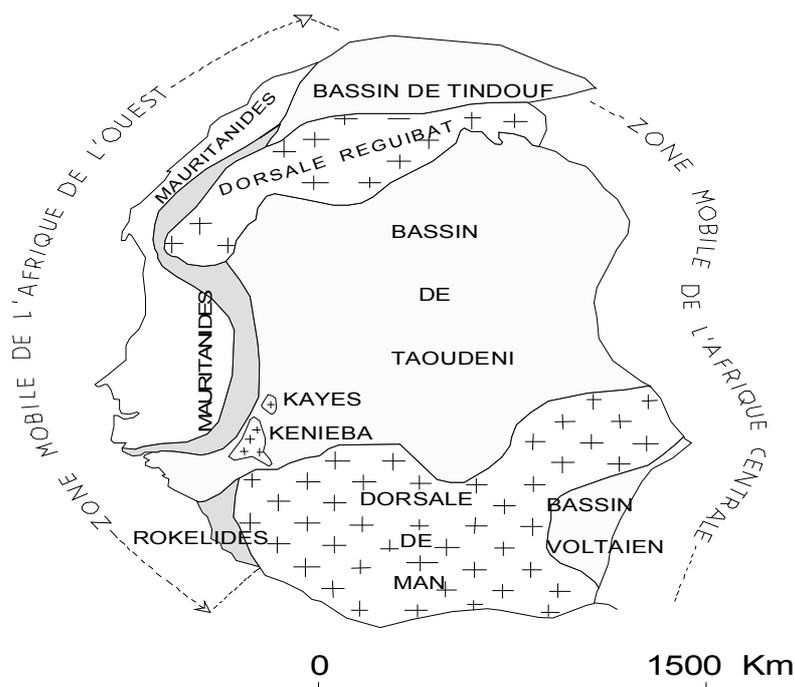
La composition chimique des eaux est fortement liée à la nature des terrains qu'elle traverse. Ce chapitre se propose de décrire les différentes formations géologiques de la zone de Dindéfello ainsi que son système hydrogéologique.

### II-1 Géologie

Les formations protérozoïques dans lesquelles s'inscrit la géologie du terroir de Dindéfello font partie des formations post-éburnéennes qui définissent en partie le craton ouest africain.

Le craton ouest africain est limité au Nord par l'anti-atlas, à l'Est par la zone mobile de l'Afrique centrale et à l'Ouest par la zone mobile de l'Afrique de l'Ouest (**fig. 7**).

**Figure 7 : Le craton Ouest Africain.**



Source Bessoles 1977

-  Formations protérozoïques supérieur et paléozoïque
-  Domaine panafricain
-  Domaine archéen et paléoprotéroïque

Il est constitué :

- des terrains précambriens (Archéen et Protérozoïque inférieur)
- des formations panafricaines (qui entourent les terrains précambriens)

Le craton ouest africain comprend trois unités :

La dorsale de Réguiabat au Nord

La dorsale de Leo-Man au Sud

Les boutonnières de Kédougou-Kéniéba (au Sénégal) et de Kayes (au Mali).

Cet ensemble est recouvert en grande partie par le bassin sédimentaire d'âge Protérozoïque supérieur et paléozoïque des bassins de Taoudéni, de Tindouf et Voltaïn (BESSOLES, 1977).

Au Sénégal, le craton ouest africain est représenté par la boutonnière de Kédougou-Kéniéba qui est caractérisée par une évolution polycyclique comprenant :

- un cycle éburnéen affectant les formations birimiennes
- un cycle panafricain à l'Ouest marqué par la chaîne des Mauritanides.

Les formations qui constituent cette boutonnière sont peu déformées, faiblement métamorphisées et granitisées. Elles sont dites birimiennes parce que définies pour la première fois dans la rivière Birim au Ghana

### **II-1-1 Les terrains birimiens**

D'après Bassot (1966), le Birimien du Sénégal Oriental comprend un ensemble de formations plissées et métamorphisées où l'on distingue entre autres schistes, grauwackes, quartzites, cipolins.

On subdivise ces formations en deux séries :

- Série de Mako : à dominante volcanique basique qui forme une bande orientée grossièrement N-S à NNE-SSO étroite d'une vingtaine de kilomètres de large et caractérisée par la présence d'anciennes roches volcaniques interstratifiées avec des argilites, tuffs, grauwackes, schistes.
- Série de Dialé-Daléma à l'Est de la série de Mako, essentiellement de nature sédimentaire représentée par des schistes, des grauwackes...

Ce birimien a subi diverses granitisations. On distingue :

- Les granites de type Baoulé (batholite de Kakadian et batholite de Saraya) qui sont concordants et syntectoniques,
- Les granites de type Boboti qui sont syntectoniques ou tardi-tectoniques,
- Les granites de type Bondoukou discordants et post tectoniques.

## **II-1-2 Les terrains panafricains**

Les terrains panafricains reposent en discordance sur les formations précédemment citées et ne sont pas métamorphiques (CAMUS et DEBUISSON, 1963) à l'exception de deux bandes orientées SSW–NNE. L'une correspond aux collines Bassaris, l'autre débute à la frontière de la Guinée et rejoint la première pour se raccorder à la série de Bakel. Les terrains panafricains sont divisés en :

- une série infracambrienne
- des séries cambriennes

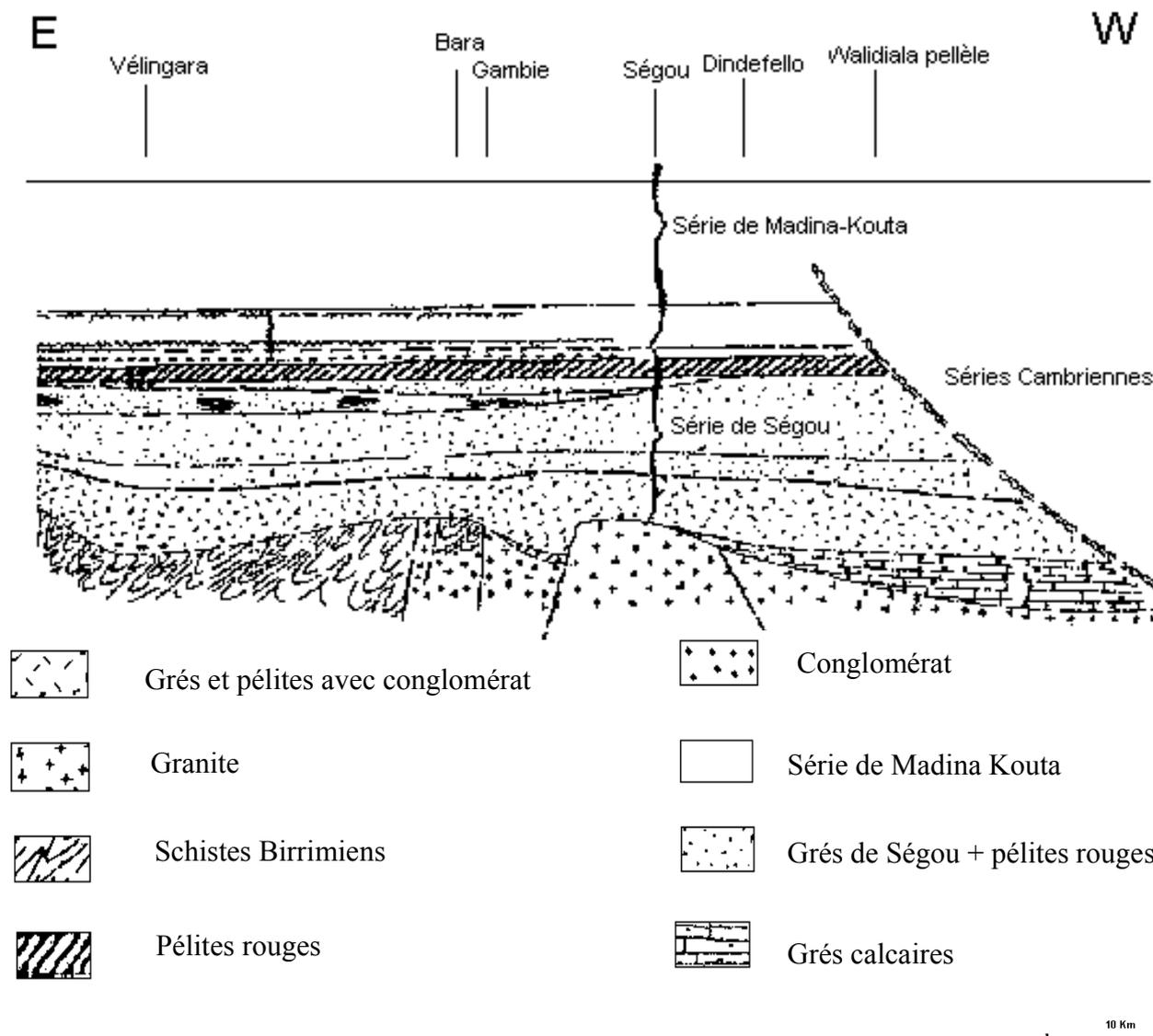
### **II-1-2-1 Série infracambrienne de Madina-Kouta**

La série de Ségou-Madina-Kouta repose en discordance sur le socle birrimien. Elle est surmontée par la série du Mali et est subdivisée en deux grands groupes (**fig. 8**) :

- le groupe de Ségou à la base
- le groupe de Madina-Kouta au sommet.

Pour les besoins de notre étude, on s'est arrêté à la géologie du groupe de Ségou. Les formations du groupe de Madina-Kouta ne feront pas l'objet d'un examen détaillé.

Figure 8 : Bassin sédimentaire de Ségou-Madina Kouta (Plan minéralogique du Sénégal).



Le groupe de Ségou est plus épais à l'Ouest et est subdivisé en deux formations : la formation de Pellèle et la formation de Dindéfello (**fig. 9**).

#### **II-1-2-1-1 La formation de Pellèle**

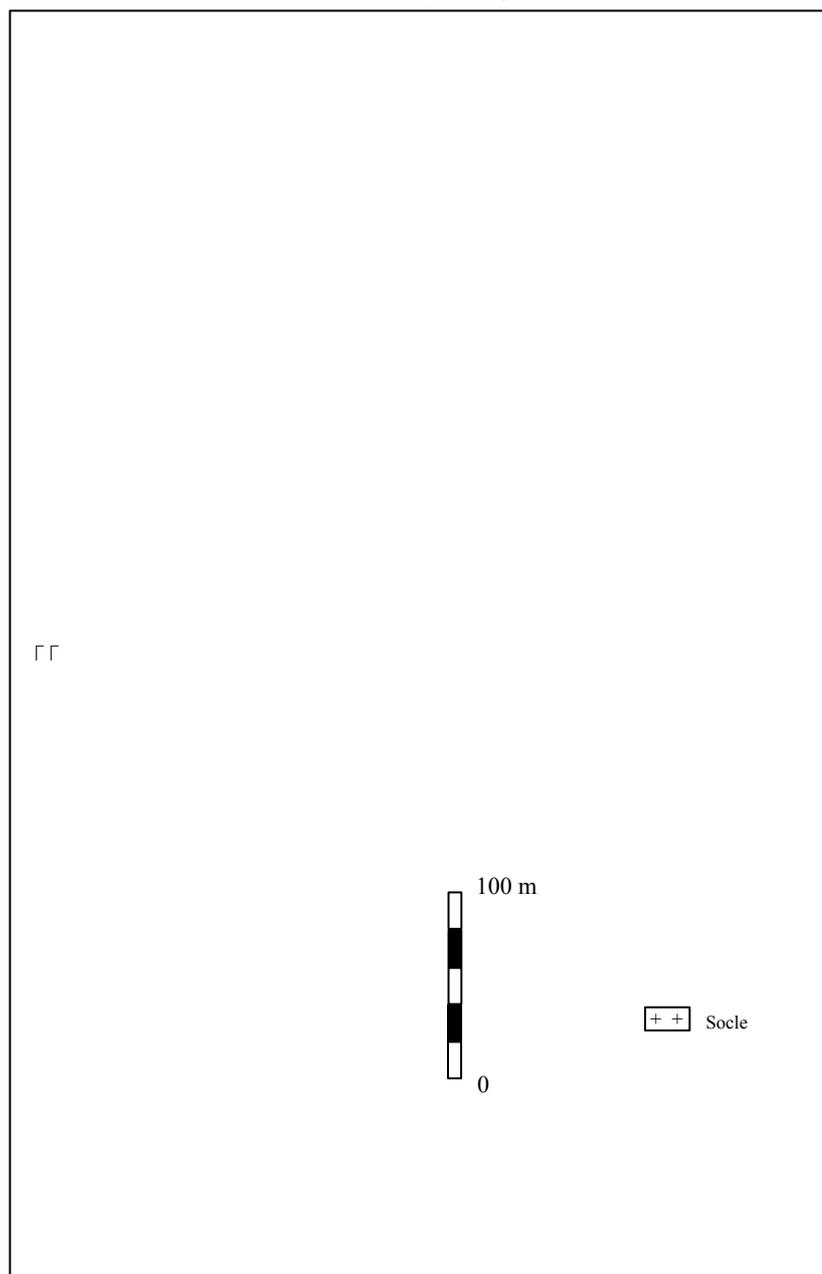
La formation de Pellèle a une épaisseur d'environ 200m. C'est une formation sédimentaire pélitico-gréseuse carbonatée à dominante pélitique rouge. Elle repose sur le socle archéen à birrimien et débute par un conglomérat de base clast support formé d'éléments arrondis pris dans le socle.

#### **II-1-2-1-2 La formation de Dindéfello**

La formation de Dindéfello a une épaisseur d'environ 250m et est composée de trois membres :

- un membre inférieur (environ 100m) caractérisé par une alternance de bancs de grès moyens à fins centimétriques à métriques et de niveaux pélitiques plus épais.
- un membre moyen (environ 100m) qui affleure le long de la frontière sénégaloguinéenne ; on l'appelle grès de Dindéfello. Ce membre est très épais à l'ouest où il forme la cascade de Dindéfello ; vers l'Est son épaisseur diminue et finit par se biseauter sur le horst granitique de Sékoto. Dans les parties les plus connues (surtout au niveau de la cascade), ce membre est formé d'une alternance rythmique quelque fois cyclique de deux termes A et B. Chacun de ces termes est un bed set de barres gréseuses. Dans le terme A, les barres gréseuses sont minces (centimétriques) avec des intercalations de lamines de pélites plus ou moins abondantes. Les termes B quant à eux contiennent des barres gréseuses qui peuvent être très épaisses ; et les lamines de pélites sont soit absentes soit subordonnées.
- le membre supérieur est constitué de grès d'une épaisseur d'environ 50m. C'est un grès qui présente une morphologie particulière ce qui lui vaut le nom de grès ruiniformes. Ces grès présentent une structure identique à celle des grès du terme A du membre précédent ; par contre le faciès est différent. Ce sont des grès roses feldspathiques, glauconieux grossiers, voire micro conglomératiques. Ils peuvent également être argileux. A l'ouest les grès ruiniformes disparaissent pour laisser la place à des grès blancs relativement grossiers qui terminent la série.

**Figure 9 : Stratigraphie du groupe de Ségou (adapté de Deynoux et al, 1992).**



### II-1-2-2 les séries cambriennes

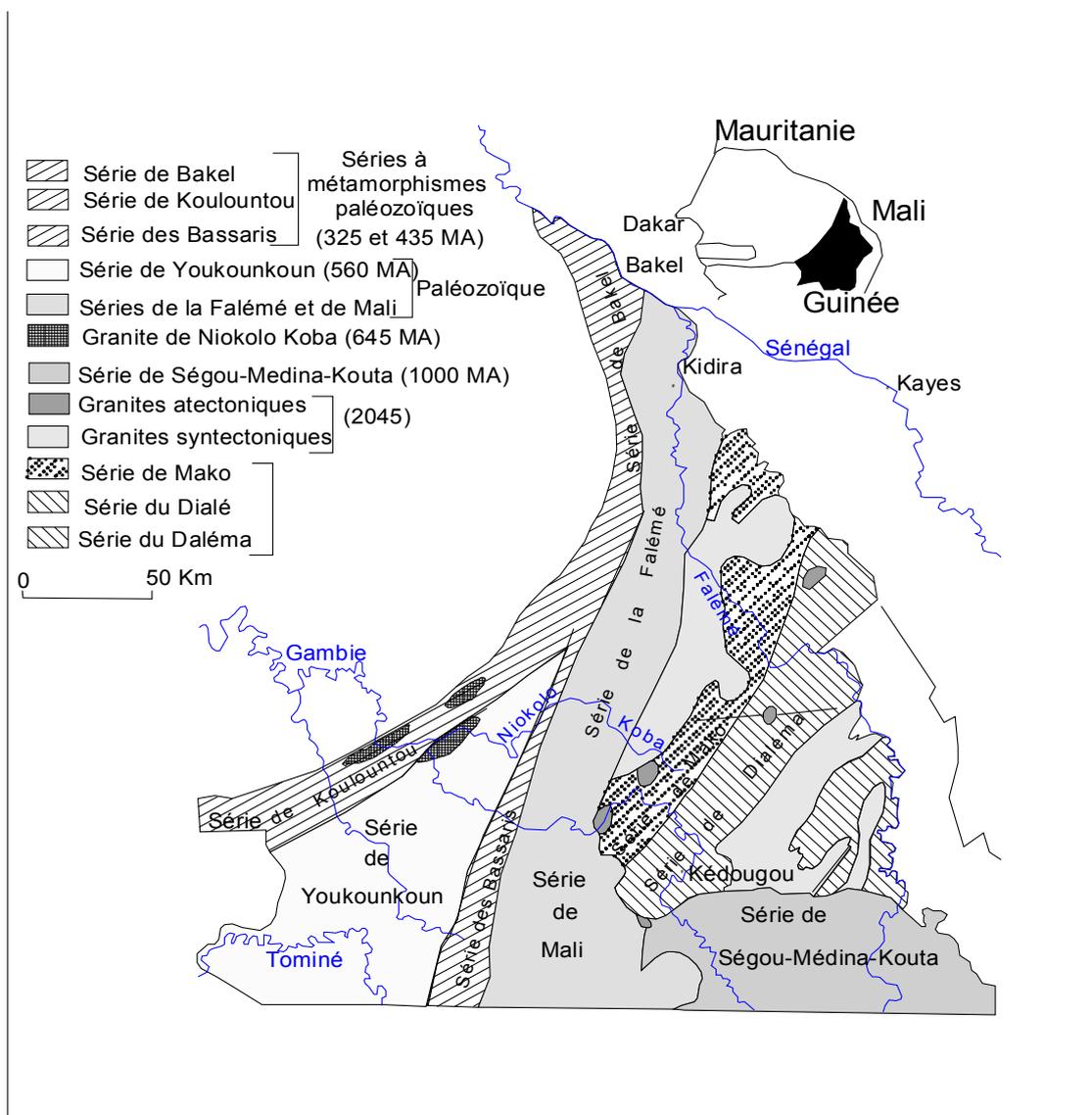
Elles sont représentées dans la **figure 10**. On distingue :

- série du Mali : elle est située à l'ouest du méridien  $12^{\circ}25'$  et débute par la tillite surmontée successivement par des dolomies calcaires, des jaspes et enfin un complexe à dominante pélitique ;
- série de la Félémé comprend des formations volcaniques à volcano-sédimentaires non métamorphisées qui présentent une structure synclinale déversée vers l'Est.

Elle se raccorde avec la série du Mali au sud et passe vers l'ouest à la série des Bassaris ;

- série des Bassaris : elle est formée de roches peu métamorphiques : schistes sériciteux, schistes verts à chlorite ... Elle disparaît au Sud sous les grés blancs du Fouta-Djallon et au Nord rejoint la série de Koulountou pour former la série de Bakel ;
- série de Youkounkou comprend de bas en haut une série volcanique de base, des pélites et argilites, des grés rouges. La série forme un synclinal qui se ferme vers le NE près de Niokolokoba et disparaît sous les grés blancs du Fouta-Djallon ;
- série de Koulountou comprenant des schistes sériciteux, des micaschistes à muscovite, des porphyroïdes et des orthogneïss. Elle est large d'une trentaine de km et rejoint au Nord la série des Bassaris ;
- série de Bakel comprend des roches à muscovites (quartzites et micaschistes) dans sa partie occidentale et dans sa partie orientale des faciès sériciteux (quartzites, schistes, très rarement amphibolites) qui semblent passer progressivement vers l'Est aux formations non métamorphiques de la série de la Falémé.

Figure 10 : Esquisse géologique du Sénégal Oriental (Bassot 1960, in Dème 2003)



### **II-1-3 Les cuirasses latéritiques**

Les changements climatiques qui ont suivi la mise en place de ces différentes formations géologiques sont à l'origine d'une importante altération physico-chimique des roches (en climat chaud et humide) entraînant la formation d'un épais manteau latéritique du crétacé à l'actuel. Ce cuirassement concerne surtout des composés d'hydroxydes de fer et de manganèse "qui s'incrustent en un ou plusieurs horizons, se cristallisent et durcissent sous l'effet de températures élevées" (DIOUF, 1996).

### **II-1-4 Tectonique**

A l'échelle du craton, trois phases majeures successives de déformation ont été définies :

- une première phase D1 tangentielle intervenue entre le dépôt du birimien inférieur sédimentaire et du birimien supérieur volcanique. Cette tectonique se situe entre 2112 et 2100 Ma (FEYBESSE *et al*, 1989). Dans la boutonnière de Kédougou-Kéniéba, elle n'affecte que les formations à dominante sédimentaire ; elle est d'extension régionale et est marquée par une foliation synchrone d'un métamorphisme schiste-vert.
- deux autres phases D2 et D3 affectant le birimien supérieur. Cette tectonique transcurrente dont l'âge se situerait entre 2096 et 2073 Ma (FEYBESSE *et al*, 1989) est responsable de la formation de plis d'extension régionale et d'une génération de décrochements et chevauchements en certains endroits. Elle est également responsable de nombreuses émissions volcaniques le long des fractures profondes de la croûte et serait liée à la genèse de granitoïdes (batholite de Saraya, granite de Gamaye et de Boboti).

Le bassin sédimentaire de Madina-Kouta (qui repose sur ce socle) s'est formé lors d'une distension tardi-birimienne et se subdivise en zones de hauts-fonds séparées par des fossés. Les accidents contrôlant la sédimentation ont provoqué son découpage en mosaïque.

Hormis la distension initiale dont l'influence se fait surtout sentir dans la série de Ségou, aucune phase tectonique n'est venue par la suite perturber la sédimentation ce qui explique la monotonie de la série.

## II-2 Les ressources en eau

### II-2-1 Les eaux de surface

L'ensemble des cours d'eau qui traversent le terroir de Dindéfello appartient au bassin versant supérieur du fleuve *GAMBIE* qui prend sa source en Guinée dans les monts Fouta Djalon.

La plupart de ces cours d'eau se caractérisent par leur écoulement temporaire alimenté par des pluies d'hivernage. Ces ruisseaux prennent leur source au niveau du talus qui borde le plateau. Ils coulent sur du matériel rocheux et leur écoulement est tantôt superficiel tantôt souterrain. En effet, dans le lit de ces cours d'eau, l'eau s'infiltré par endroits puis ressort quelques mètres plus loin. Leur crue a lieu en août-septembre tandis que l'écoulement dure jusqu'en février, exceptionnellement jusqu'en mars-avril.

Le cours d'eau à écoulement permanent le plus important est le *FELLOWOL* qui traverse Dindéfello pour rejoindre le *THIOKOYE* (affluent de la *GAMBIE*). Il prend sa source sur le plateau qu'il quitte en formant une cascade.

Le *FELLOWOL* présente trois biefs. Sur le plateau, l'écoulement est fluvial et son cheminement présente un vallon à la végétation dense. Il s'infiltré par la suite dans les roches et ressort par des failles horizontales juste en haut de l'escarpement. Au niveau de l'escarpement, le cours d'eau présente un écoulement torrentiel et forme la cascade de Dindéfello. Celle-ci d'une hauteur avoisinant les 80m a creusé en contrebas une vasque de 18.80m de long sur 15.80m de large qui recueille l'eau fraîche et claire. En aval de la cascade, l'écoulement redevient fluvial ; le *FELLOWOL* s'infiltré par endroits dans le terrain. Il présente les mêmes caractéristiques que les cours d'eau à écoulement temporaire (lit parsemé de pierres ; brièveté de la crue ; limpidité de l'eau...).

La pulvérisation d'une partie de l'eau en de fines gouttelettes au cours de sa chute le long de la falaise crée des embruns qui humidifient l'air. Cette humidification de l'air est à l'origine du microclimat (très favorable au développement d'une végétation guinéenne) qui règne dans cette région aux conditions climatiques difficiles.

Vers la fin de la saison sèche, on note une augmentation des activités humaines et animales au niveau du cours d'eau à cause du tarissement des cours d'eau temporaires et de la majorité des puits.

## **II-2-2 Les eaux souterraines**

Les formations anciennes du Sénégal Oriental ne présentent pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique et cette région est particulièrement défavorisée en ce qui concerne les ressources en eau souterraine (DEPAGNE et MOUSSU, 1967).

En effet, la nature du sous-sol constitué de terrains anciens antécambriens et primaires le plus souvent cristallins ou métamorphiques exclut toute possibilité d'existence d'une nappe généralisée. Les ressources en eau souterraine sont donc très faibles et très sporadiques.

A Dindéfello, on distingue deux systèmes aquifères : un système aquifère dans les formations sédimentaires (grés fracturés) du plateau et un deuxième système aquifère dans les formations du socle.

### **II-2-2-1 Aquifères des grés fracturés**

Les grés de la formation de Dindéfello ont une perméabilité matricielle très faible voire nulle à l'état sein. Cependant, l'intense fracturation ayant affecté ces grés leur confère une perméabilité secondaire de fissure qui favorise l'accumulation et la circulation des eaux en leur sein. Ces nappes seraient alimentées par les eaux de pluies.

Signalons que ces nappes ne sont exploitées qu'au niveau des sources CrS1, CrS2, CrS3 et CrS4 (nommées ainsi dans le cadre de la présente étude) à cause de la nature du substratum qui ne permet pas le fonçage de puits.

### **II-2-2-2 Aquifères du socle**

Le socle ancien du Sénégal Oriental a été affecté par plusieurs phases tectoniques. La superposition de ces différentes phases tectoniques se traduit par une intense fracturation. Ces fractures sont le siège de circulation d'eaux souterraines.

Par ailleurs ces formations magmatiques et métamorphiques sont généralement recouvertes par un manteau d'altérites, représentant le résultat d'une désagrégation physico-chimique en milieu tropical humide.

Ainsi, d'une manière générale dans les formations cristallines, cristallophylliennes et sédimentaires anciennes du socle les réserves d'eaux souterraines sont localisées dans la partie supérieure altérée, mais sont drainées préférentiellement par les fissures et fractures sous-jacentes ouvertes parfois sur de grandes profondeurs (CEFIGRE, 1990). On distingue alors deux types de réservoirs (**Fig. 11**) :

### **II-2-2-1 Les réservoirs inférieurs :**

Ils sont de deux types :

- les réservoirs de fissures correspondant à une zone plus ou moins intensément fissurée et partiellement altérée vers le haut qu'on rencontre au dessus de la roche saine. Elle comporte de nombreuses fissures et diaclases à pendage variable, ouvertes mais pouvant être remplacées par des produits d'altération (CEFIGRE, 1990). L'épaisseur de ce réservoir est encore mal connue.
- Les réservoirs de fractures majeures ou de failles : les formations du socle sont découpées par des réseaux de fractures majeures dont la longueur peut atteindre plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de kilomètres. Ces fractures très profondes et subverticales sont jalonnées par des zones broyées susceptibles d'intéresser des bandes de terrains larges de quelques mètres à quelques centaines de mètres (CEFIGRE, 1990). Elles sont donc le plus souvent le siège de circulation d'eaux souterraines.

Ces réservoirs présentent des variations piézométriques réduites durant l'année (BANTON et BANGOY, 1997).

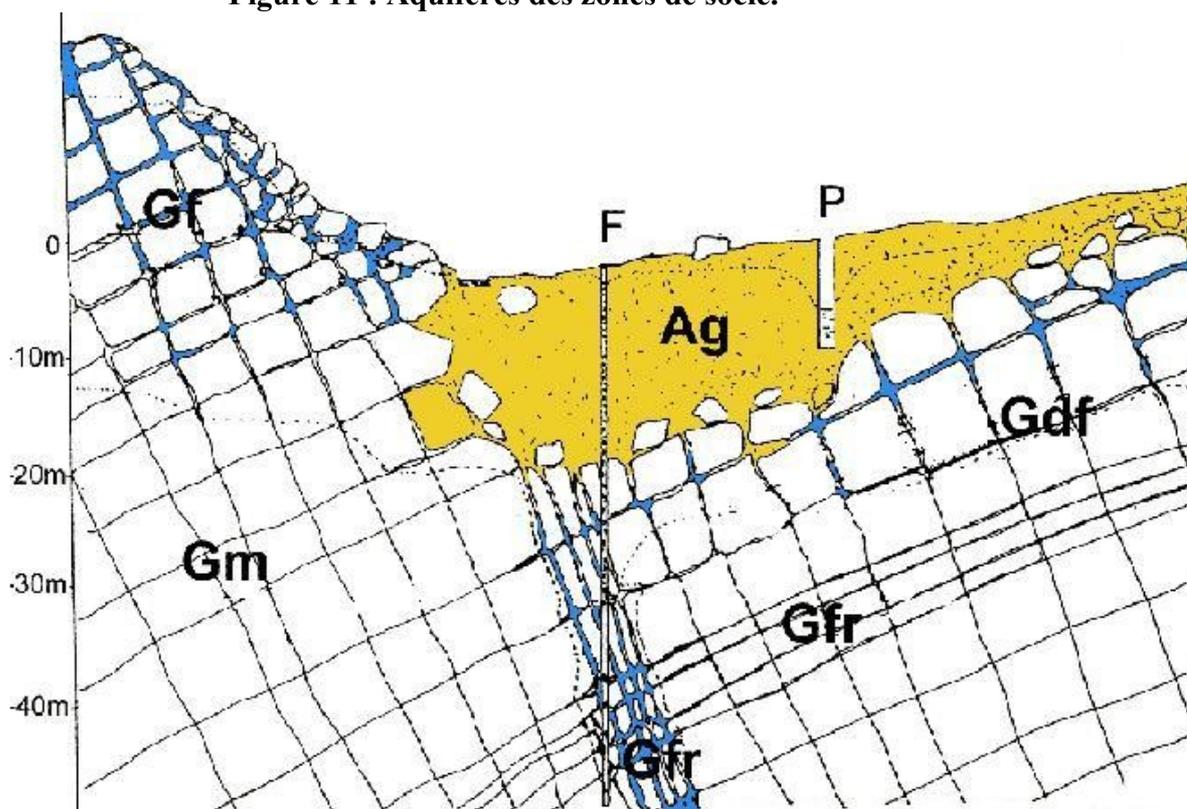
### **II-2-2-2 le réservoir supérieur d'altérites**

Les altérites se caractérisent par une porosité plus ou moins grande et par un réseau de fractures non colmatées. La quasi totalité des réserves en eau des régions à substratum granitique se retrouve dans cette frange altérée, dont les potentialités réelles des aquifères sont fonctions de son épaisseur et de sa perméabilité (KABORE, 1975).

En dehors des nappes qu'on rencontre dans les formations anciennes, s'opère dans la cuirasse latéritique un drainage à travers les altérites avec écoulement vers les marigots auxquels est fourni un appoint de crue (CAMUS et DEBUISSON, 1963). En saison sèche il se produit le phénomène inverse ; ce drainage a lieu des nappes alluviales et marigots vers la cuirasse. Ce phénomène donne naissance à des résurgences à certains endroits qui suffisent à l'alimentation de petits villages.

Par ailleurs les cours d'eau ont entaillé des vallées dans les terrains ; vallées souvent comblées d'un léger manteau d'alluvions. Celui-ci pouvant contenir une nappe. Cependant, les dépôts alluvionnaires des cours d'eau et des marigots sont souvent très minces et discontinus ; des biefs rocheux affleurant fréquemment. Ces nappes alluviales s'épuisent assez rapidement en saison sèche du fait de l'évaporation.

Figure 11 : Aquifères des zones de socle.



**F** : Forage  
**P** : Puits  
**Ag** : Arène granitique  
**Gm** : Granite massif non fracturé  
**Gdf** : Granite décompressé fissuré  
**Gf** : Granite fissuré  
**Gfr** : Granite fracturé

### II. 3 Conclusion

Le terroir de Dindéfello est constitué de terrains très anciens représentés par le socle birimien sur lequel repose la couverture sédimentaire du protérozoïque inférieur. Ces terrains ont subi de nombreuses phases de déformation leurs conférant des caractéristiques particulières. En effet, il n'existe pas dans cette zone de nappe généralisée ; les nappes sont discontinues et peu étendues. Les aquifères sont peu profonds comparés à ceux du bassin sédimentaire et leur productivité est fortement tributaire de leur degré de fissuration, de fracturation ou de leur caractère pétrographique, mais aussi de la pluviométrie.

## **CHAPITRE III : ENVIRONNEMENT SOCIO-ÉCONOMIQUE**

Le village de Dindéfello joue un rôle économique important dans la zone. Ce chapitre décrit l'organisation sociale du village ainsi que les différentes activités économiques qui rythment la vie des villageois.

### **III-1 Historique du peuplement du village**

Le village de Dindéfello a été créé en 1921 par un chasseur du nom de Diampaté Traoré venu de Ségou (au Mali) à la recherche de zones giboyeuses. Il défricha le site jusqu'au pied de la colline et l'appela Dindéfello, c'est-à-dire « bas de la montagne »

Le peuplement du village fût par la suite assez rapide. En 1930 arriva une première vague de migrants en provenance de la Guinée fuyant l'administration coloniale ; en 1958 arriva une deuxième vague de migrants fuyant le régime du Président Sékou Touré.

Depuis la création du village en 1921, la cascade a joué successivement trois fonctions différentes : une fonction mystique et culturelle (bain des circoncis), une fonction éducative et didactique (séances d'observation pour les élèves de l'unique école du village et étudiants de l'Université de Dakar), et aujourd'hui elle joue un rôle essentiellement touristique.

La population de Dindéfello est estimée à 1040 habitants (LEDAUPHIN, 2001) et les principales ethnies qui la composent sont : les Peuhls, les Bambaras, les Diakhankés, les Sarakholés et les Mamdingues.

Le village présente deux quartiers : Leibolol au nord (partie basse) et Dowbolol au Sud (plateau) séparés par une piste allant du village de Ségou au village de Mamadou Boundou.

### **III-2 Activités économiques**

#### **III-2-1 L'agriculture**

Elle constitue avec l'élevage les principales activités productives à Dindéfello. Traditionnellement, le mil et le fonio étaient les principales cultures et étaient surtout destinés à l'autoconsommation ou au troc. Ces cultures sont aujourd'hui supplantées par le maïs plus apprécié du point de vue technique de culture, rendement, alimentation et gain financier. La culture d'arachide introduite depuis l'époque coloniale occupe de grandes superficies. La culture du coton est aussi largement pratiquée surtout depuis le redémarrage des activités de la SODEFITEX dans la zone.

L'urée et les engrais NPK sont les principaux moyens de fertilisation des sols en plus de la jachère, du brûlis et de l'épandage de fumier.

### **III-2-2 L'élevage**

L'élevage occupe une place de choix dans les activités des populations de Dindéfello. Cette population à majorité Peulh pratique l'élevage de bovins, d'ovins, de caprins tous de race Ndama qui se caractérise par la résistance à la Trypanosomiase (maladie qui sévit dans les zones soudaniennes et guinéennes).

Les ânes sont utilisés comme bêtes de somme surtout pour le transport de l'arachide et du coton au moment des récoltes.

La volaille est présente dans toutes les concessions et est dominée par l'espèce locale.

### **III-2-3 La pêche**

La pêche n'est plus pratiquée depuis longtemps en raison de la diminution des poissons dans les cours d'eau du terroir. Actuellement les carpes sont l'espèce la plus observée dans les cours d'eau en particulier pendant la saison des pluies.

### **III-2-4 Le commerce**

Le développement de l'activité commerciale à Dindéfello est à attribuer à son marché hebdomadaire ou « Loumo ».

Le Loumo attire presque tous les villages environnants y compris ceux de la Guinée voisine. Tous les produits agricoles y sont vendus ou échangés sauf l'arachide (commercialisé surtout à la coopérative).

### **III-2-5 Le tourisme**

Le site de Dindéfello est l'un des endroits les plus visités du département de Kédougou et il est mentionné dans différents guides de voyage. Chaque année, des centaines de touristes visitent la région de Tambacounda particulièrement la réserve biosphère de Niokolo Badiar et participent à des circuits organisés par de petites agences sénégalaises et des tours opérateurs étrangers (Nouvelles Frontières, Bassari Rutas) avec passage « obligé » à Dindéfello.

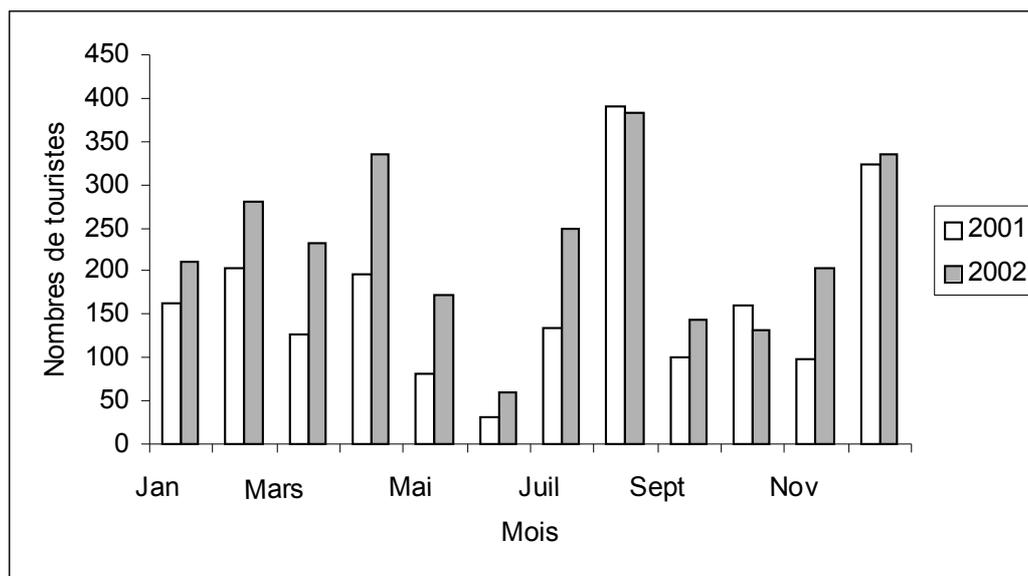
Les individuels et clients des petites agences sénégalaises ne dorment généralement pas à Dindéfello. Ils se rendent sur le site la journée et retournent à Kédougou où ils sont hébergés. Mais c'est une clientèle qui demeure intéressante puisqu'elle consomme en repas et boisson et paie le droit de visite à la cascade.

Les tours opérateurs étrangers quant à eux organisent des circuits dans un esprit aventure. Ils sont souvent autonomes du point de vue restauration mais après de nombreuses étapes dans des villages non équipés, Dindéfello représente une étape reposante pour sa cascade et offre également des possibilités de ravitaillement. Les clients des tours opérateurs étrangers constituent la source de revenus la plus stable (ROY, 2003), exemple le sous-traitant de

Nouvelles Frontières organise de un à trois circuits par semaine sur le Sénégal oriental dont une étape à Dindéfello.

Le diagramme de fréquentation du site pour les années 2001 et 2002 (**fig. 12**) montre que le site de Dindéfello est fréquenté pendant toute l'année. On note cependant que c'est durant les périodes allant de décembre à mai et de fin juillet à fin septembre que beaucoup de touristes arrivent sur le site.

**Figure 12 : Diagramme de fréquentation du site de Dindéfello 2001 et 2002**



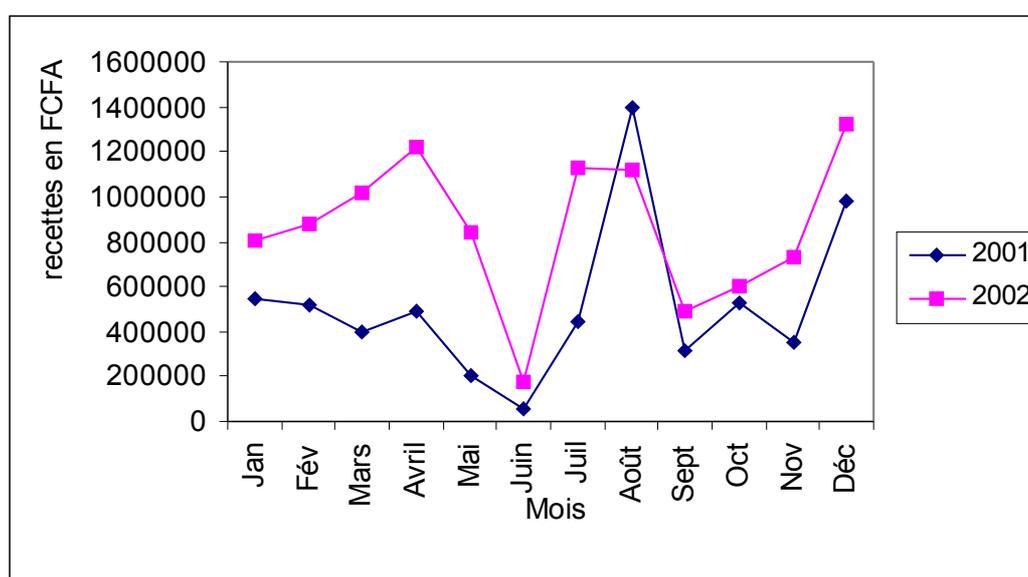
Durant la saison des pluies viennent essentiellement des Espagnols et des Italiens ; le reste de l'année ce sont surtout les Français et Belges qui se rendent sur le site et plus rarement quelques autochtones venus de différentes régions du pays.

Le campement touristique qui accueille tout ce monde fut construit en 1989 par les populations locales et les corps de la paix américains grâce à un soutien financier de l'ambassade des Etats-Unis. Ce campement apparaît comme un GIE qui s'inscrit dans une logique de développement du tourisme sur Dindéfello. Il appartient à la communauté de Dindéfello et permet de générer des emplois et ainsi de lutter contre l'exode rural et la pauvreté. Il est dirigé par un conseil d'administration (composé des principaux responsables du village) et d'un comité de gestion constitué : d'un président et ses deux adjoints, d'un secrétaire général et son adjoint, d'un trésorier et son adjoint et deux commissaires aux comptes. En plus des membres de ce comité, il est procédé tous les deux ans à l'élection d'un gérant chargé du bon fonctionnement des services offerts par le campement.

Les recettes du campement sont composées des nuitées, boissons et repas ainsi que les visites de sites et excursions conduites par les guides du campement. Elles affichent une importante

progression par an (**fig. 13**) d'où l'attention de plus en plus rigoureuse sur la gestion. Les 30% de ces recettes sont reversés aux salariés du campement. Le reste est consacré à des projets locaux (groupement féminin, les autres GIE...), à la santé (achat de médicaments, évacuation des malades...), à l'éducation (achat de matériels pour l'unique école du village...), aux frais de déplacements des élus locaux lors des réunions, à des aides diverses (entretien et aménagement du campement, réparation des forages en cas de panne...) ainsi qu'au paiement de la taxe rurale.

**Figure 13 : Evolution des recettes du campement au cours des années 2001 et 2002.**



Depuis juillet 2002, le Conseil Général de l'Isère (France) et le Conseil Régional de Tambacounda ont signé une Convention de Coopération Décentralisée et s'associent pour élaborer un nouveau programme d'actions exécuté en partenariat avec leurs opérateurs techniques respectifs (ROY, 2003). Ces actions concernent le tourisme, la santé, l'hydraulique, l'éducation et la culture. C'est dans le cadre de ce programme de développement de la région de Tambacounda que le Conseil Général de l'Isère s'est engagé à financer diverses actions afin de promouvoir l'écotourisme à Dindéfello (formation de guides, rénovation et amélioration du campement, aménagement du site...).

### **III-3 APPROVISIONNEMENT EN EAU**

L'approvisionnement en eau s'effectue à travers le cours d'eau, les puits traditionnels qui captent la nappe des altérites et les forages qui captent la nappe profonde contenue dans le réservoir de fracture

#### **III-3-1 Les puits**

Le village ne compte à ce jour une vingtaine de puits dont la profondeur varie en fonction des sites et de la saison.

L'eau des puits n'est utilisée pour la boisson que pendant la saison des pluies. Le reste de l'année, elle est utilisée pour les usages domestiques.

#### **III-3-2 Les forages**

Le village compte deux forages fonctionnels (F2) réalisé en 1984 lors du programme hydraulique villageoise et pastorale financé par la CEAO et F1 réalisé en 1996. Leurs débits sont estimés à 2 m<sup>3</sup>/h (F1) et 10 m<sup>3</sup>/h (F2) et les valeurs de transmissivité à 3.8 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s pour F1 et 3.9 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s pour F2 (BRGM, 1984).

Ces forages qui n'étaient jadis exploités que pour le bétail et pour les besoins domestiques sont devenus aujourd'hui l'une des principales sources d'approvisionnement en eau de boisson des populations. L'eau recueillie est filtrée et conservée dans des canaris sans aucune autre forme de traitement.

Il faut signaler cependant que ces forages sont très souvent en panne (ce fut le cas lors de notre passage) obligeant les villageois à s'approvisionner au niveau du cours d'eau.

#### **III-3-3 Le cours d'eau**

Le cours d'eau demeure la seule source d'approvisionnement en eau de certains villages situés sur le plateau notamment le village de Dandé qui ne dispose pas de puits.

Une bonne partie des habitants de Dindéfello continue à préférer l'eau fraîche et claire de la rivière et s'approvisionne en eau de boisson au niveau des résurgences qu'on trouve le long de son cours.

### **III-4 Conclusion :**

Depuis sa création en 1921, Dindéfello a accueilli une population importante et n'a cessé de s'agrandir ; aujourd'hui il est l'un des plus gros villages de la communauté de Bandafassi. Le développement du tourisme fait qu'il est actuellement le village le plus connu et le plus visité de toute la région de Tambacounda. Le développement du tourisme s'est également

accompagné d'une croissance économique locale car les retombées de cette activité retournent à la population ce qui est un moyen assez efficace de lutter contre la pauvreté et l'exode des jeunes.

**DEUXIEME PARTIE :  
HYDROCHIMIE ET QUALITE DES  
EAUX**



## **CHAPITRE IV : METHOLOGIE**

La démarche méthodologique de cette étude à consister à une recherche documentaire, des travaux de terrain et de laboratoire. Ces différentes activités sont décrites dans ce chapitre qui traite également des différents outils qui ont servi au traitement des données.

### **IV.1 Acquisition des données**

Les données utilisées dans la présente étude ont été collectées au cours de recherches bibliographiques, de travaux de terrain et de laboratoire.

#### **IV.1.1 Recherches bibliographiques**

Elles ont concerné surtout des projets d'hydrauliques villageoises, mais également des mémoires et thèses de l'université de Dakar. Ces travaux bibliographiques ont permis par ailleurs acquérir des données climatiques de la zone régulièrement enregistrées par l'ASECNA ainsi que des cartes topographiques fournies par la DTGC.

Il faut signaler que la recherche documentaire a été très difficile du fait que cette zone n'a pratiquement plus fait l'objet d'études en dehors de celles réalisées par l'ORSTOM au début des années 80.

#### **IV.1.2 Travaux de terrain**

Les travaux de terrain se sont déroulés en deux campagnes :

- une première campagne au mois de mai 2006 au cours de laquelle on a procédé au nivellement de tous les puits du village. A partir de la carte topographique au 50.000<sup>ème</sup> du département de Kédougou, l'altitude au sol du puits nommé P1 se trouvant dans le campement touristique du village a été déterminée. Partant de ce point, tous les autres puits ont été nivelés grâce à un théodolite. Les puits étant très dispersés dans le village, un changement de repère est fait chaque fois que l'altitude du puits cible est connue.
- une deuxième campagne qui s'est déroulée en août 2006 durant laquelle les actions suivantes ont été effectuées :
  - 1- mesures *in situ* des paramètres physico-chimiques suivants : la température des eaux et leur pH grâce au pH-mètre de type HANNA HI 9024C<sup>@</sup> ; la conductivité grâce au conductivimètre de type HANNA HI 9033<sup>@</sup>.
  - 2- mesures de la profondeur de la nappe dans les puits échantillonnés à l'aide d'une sonde piézométrique lumineuse et sonore ;

- 3- détermination des coordonnées géographiques des puits échantillonnés ainsi que celles des points échantillonnés le long du cours d'eau grâce à un GPS 12 GARMIN ayant une précision de 5m ;
- 4- Prélèvement d'échantillons d'eau en vue d'analyses chimiques et bactériologiques.

**La figure 14** représente le réseau de points de prélèvement. Ce réseau de prélèvement comprend les puits villageois, les forages et les stations choisies le long du cours d'eau. Tous ces points ont été codifiés de la manière suivante :

- Les forages : la lettre « F » suivi d'un numéro (rappelons que ces derniers n'ont pas été échantillonnés car étant en panne) ;
- les puits villageois : la lettre « P » suivi d'un numéro ;
- les eaux de surface : « CrS » suivi d'un chiffre pour les sources et « Cr » suivi d'un chiffre pour les points situés le long du cours d'eau ;

Au cours de l'échantillonnage, deux échantillons ont été prélevés au niveau de chaque point : un échantillon acidifié avec de l'acide sulfurique à pH 2 destiné à l'analyse des cations, des composées azotées et des métaux lourds et un échantillon non acidifié qui a servi à l'analyse des anions.

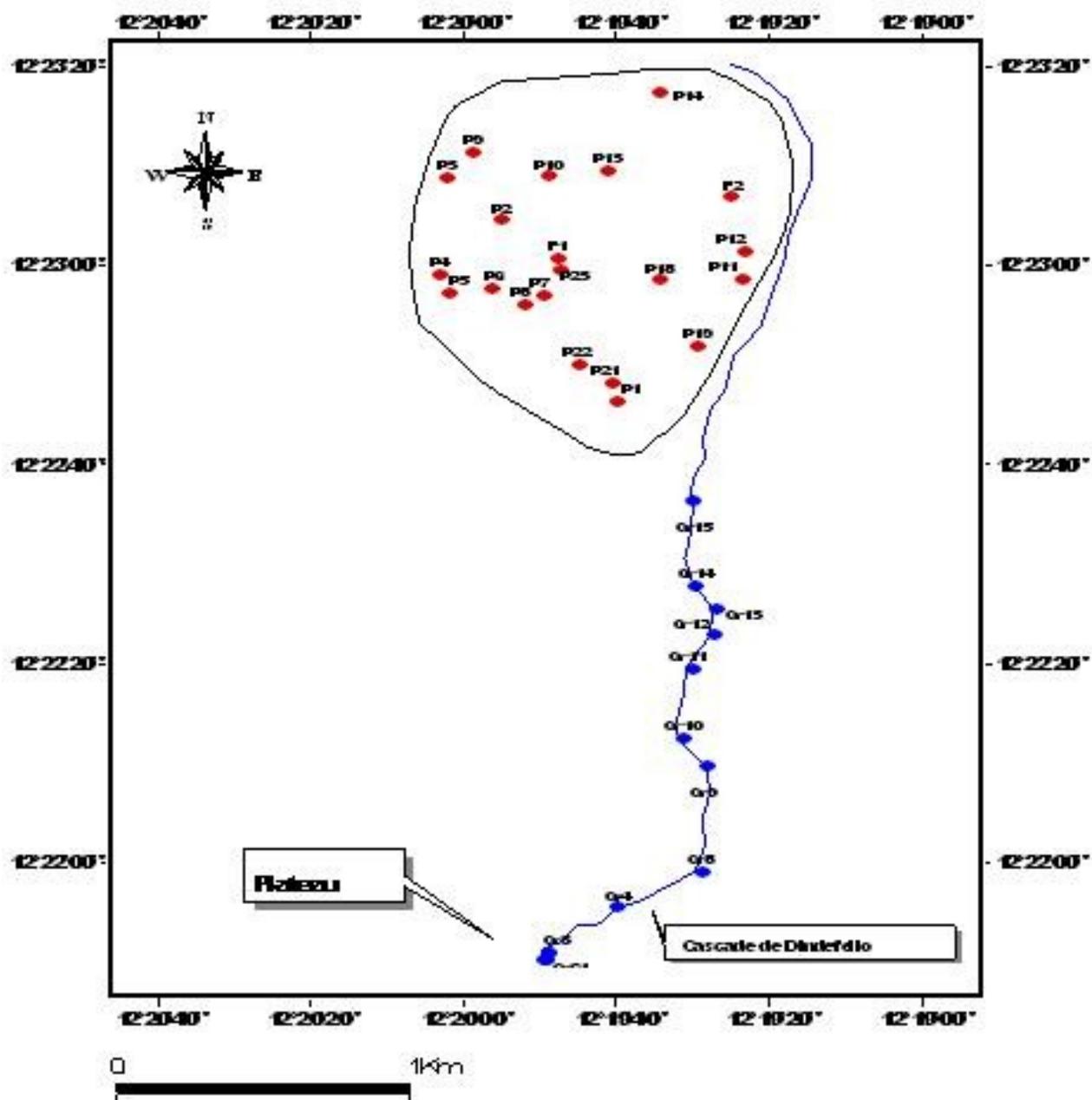
#### **IV.1.3 Travaux de laboratoire**

Les travaux de laboratoire ont consisté à analyser les échantillons recueillis sur le terrain. Ils ont été effectués au laboratoire d'hydrochimie de la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD pour les éléments majeurs et au laboratoire d'analyses et d'essais de l'ESP de Dakar pour les métaux lourds et les analyses microbiologiques. Ces analyses ont concerné les éléments suivants :

- les ions  $\text{Cl}^-$  ;  $\text{NO}_3^-$  ;  $\text{SO}_4^{2-}$  ;  $\text{Mg}^{2+}$  ;  $\text{Ca}^{2+}$  ;  $\text{K}^+$  ;  $\text{Na}^+$  ;  $\text{F}^-$  ;  $\text{Br}^-$  qui ont été déterminés par chromatographie ionique grâce au DIONEX DX 120<sup>@</sup> ;
- les métaux Cu, Ni, Pb, Zn, Cr et le fer
- les mesures du TAC (Titre Alcalimétrique Complet) qui ont été effectuées par dosage volumétrique à l'aide de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025N en présence de phénophtaléine et d'hélianthine ;
- les mesures de  $\text{DBO}_5$  et DCO des eaux du cours d'eau
- les analyses bactériologiques qui ont porté sur les coliformes fécaux, les coliformes totaux, les streptocoques fécaux et la flore mésophile aérobie totale (ou germes totaux). Elles ont concerné au niveau du cours d'eau, les sources où sont

prélevées les eaux de boisson ; et au niveau de la nappe, les puits également utilisés pour la boisson.

Figure 14 : Carte de localisation des points d'eau échantillonnés.



## **IV.2 Traitement des données**

Les données accumulées lors des différents travaux ont permis de réaliser les cartes géologiques et hydrogéologiques, des diagrammes d'interprétation et des cartes de répartition spatiales des éléments. Suivant la nature des données et en fonction du type de résultat recherché, un outil spécifique de traitement a été adopté.

### **IV.2.1 Cartes géologiques et hydrogéologiques**

Il s'agit de cartes tirées d'études antérieures, réalisées pour la plupart par l'ORSTOM, en vue d'une identification géologique et hydrogéologique du système aquifère de la zone d'étude ainsi que de sa position géographique.

Ces cartes ont été redessinées grâce au logiciel de cartographie ArcView qui est devenu de nos jours le logiciel cartographique et le SIG bureautique de référence. Outil permettant de visualiser, d'explorer, d'interroger et d'analyser les données géographiques, il permet très rapidement de les manipuler de manière totalement différente.

### **IV.2.2 Cartographie de paramètres hydrogéochimiques**

Il s'agit des cartes que nous avons-nous même réalisées grâce toujours au logiciel Arc view qui nous a permis de digitaliser la zone. Un autre logiciel : Surfer nous a permis d'avoir une représentation continue des paramètres hydrochimiques importantes pour nos interprétations.

### **IV.2.3 Diagrammes d'interprétation**

Trois types de diagramme ont été utilisés :

#### **IV.2.3.1 Diagramme de Piper**

Ce type de diagramme permet de caractériser les faciès géochimiques des eaux. Cette caractérisation est basée sur des calculs de proportions relatives des différentes espèces cationiques et anioniques analysées. Il fournit le même résultat qu'une classique caractérisation de la composition chimique par l'anion principal ou le cation principal. Cependant, il a l'avantage de définir en même temps un certain nombre de familles d'eau et de mettre clairement en évidence l'évolution de la minéralisation.

Le diagramme de Piper est formé d'un 1<sup>re</sup> triangle pour les cations, d'un 2<sup>ème</sup> triangle pour les anions et d'un losange découpé en familles d'eau. Dans le diagramme la concentration relative de chaque élément calculée permet de placer les points sur les triangles qui sont ensuite projetés sur le losange. Cette concentration est définie par la proximité des points de projection par rapport aux différents sommets ou pôles. Les différentes positions des points dans le losange permettent de définir les faciès géochimiques des eaux analysées.

#### IV.2.3.2 Diagramme de Chadha

C'est l'équivalent du diagramme de Piper puisqu'il permet également de classer les eaux naturelles ; mais il est plus simple à construire si bien qu'on peut utiliser la plupart des tableurs pour le concevoir. Il a été utilisé dans le traitement des données pour confirmer les résultats du Piper mais surtout pour identifier les processus hydrochimiques qu'il explicite plus clairement et plus simplement.

Ce diagramme (**fig. 15**) comprend deux axes X et Y. Sur l'axe des X, on place la différence en pourcentage des teneurs (en milliéquivalents) entre les alcalino-terreux ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ) et les alcalins ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ). Sur l'axe des Y, on reporte la différence en pourcentage des teneurs (en milliéquivalents) entre les anions d'acides faibles ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) et les anions d'acides forts ( $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ ). Les différences en pourcentage des teneurs en milliéquivalents donnent donc les coordonnées X et Y des points qui sont positionnées dans les principaux sous domaines ou champs du diagramme pour définir le caractère d'ensemble de l'eau. Le diagramme de Chadha comporte 4 champs délimités par les axes (fig.15) :

- +X +Y (champ 5) champ où les alcalino-terreux et les anions d'acides faibles excèdent les alcalins et les anions d'acide fort respectivement ; on a des eaux de type  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  qui sont des eaux de recharge (les processus de dissolution des minéraux carbonatés prédominent) ;
- +X -Y (champ 6) : les alcalino-terreux et les anions d'acides forts excèdent les alcalins et les anions d'acide faible respectivement ; on obtient des eaux de type  $\text{CaCl}_2$  indiquant que les phénomènes d'échange de base inverse prédominent ;
- -X -Y (champ 7) : champ où les alcalins et les anions d'acides forts dominent les alcalino-terreux et les anions d'acide faible respectivement ; les eaux sont donc de type  $\text{NaCl}$  ; ce qui exprime un mélange avec des eaux salées (intrusion saline ou effets des embruns marins) ;
- -X +Y (champ 8) : les alcalins et les anions d'acide faible excèdent les alcalino-terreux et les anions d'acide fort respectivement ; on obtient des eaux de type  $\text{NaHCO}_3$  exprimant la prédominance des phénomènes d'échange de base.

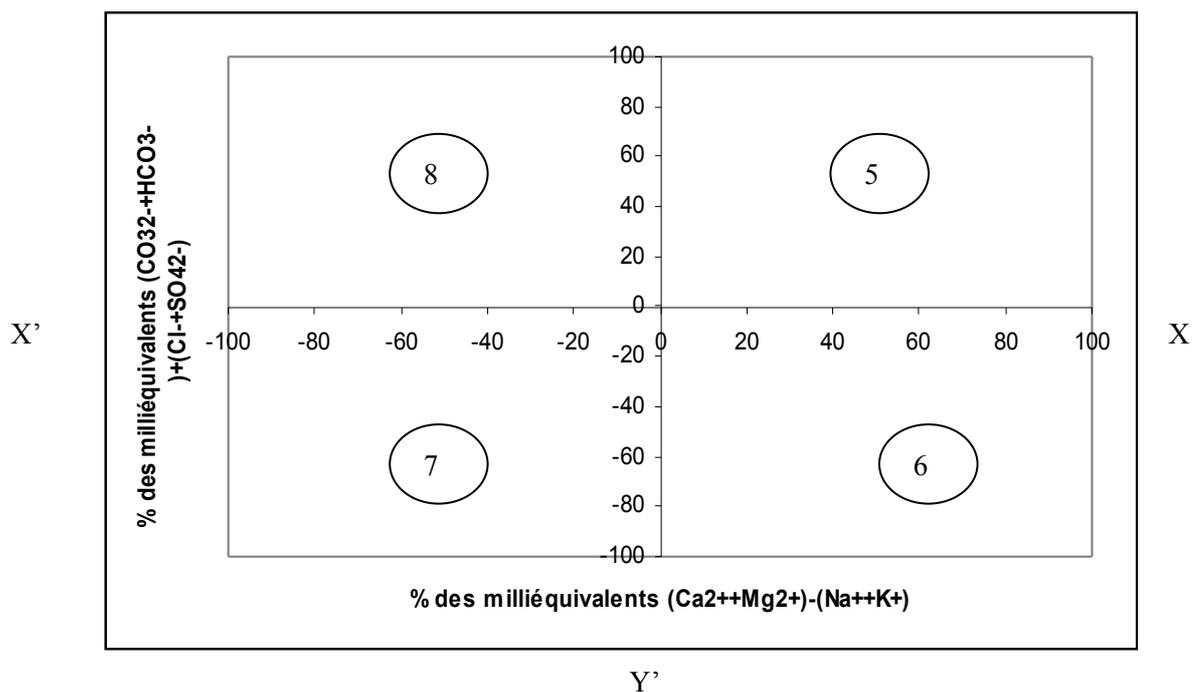
Les axes forment elles aussi 4 champs numérotés de 1 à 4

#### IV.2.3.3 Diagrammes binaires

Les corrélations linéaires entre certains éléments chimiques pertinents permettent de rechercher également l'origine de la minéralisation en évaluant les degrés de dépendance entre les différents paramètres concernés ; L'évaluation se fait à l'aide des coefficients de

corrélations déterminés par des calculs statistiques. La corrélation entre deux paramètres sera d'autant plus significative que le coefficient de corrélation R sera proche de 1. Ainsi les corrélations ont été établies entre tous les éléments majeurs pris deux à deux ; ce qui nous a permis d'obtenir des matrices de coefficients de corrélation pour les interprétations (Annexe VI).

**Figure 15 : Diagramme de chadha (CHADHA, 1999).**



## CHAPITRE V : PRESENTATION DES RESULTATS

Ce chapitre présente les différents paramètres physiques et chimiques des eaux ainsi que leurs faciès géochimiques. L'étude de l'évolution spatio-temporelle des éléments chimiques prédominants, ainsi que les rapports entre ces éléments permettra d'évoquer des hypothèses sur l'origine de la minéralisation des eaux et les processus modificateurs de leur composition. La comparaison dans le temps ce fera par rapport à une étude que nous avons nous même faite sur la zone en 2004.

### V.1 paramètres physiques des eaux du cours d'eau

**Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques des eaux du cours d'eau**

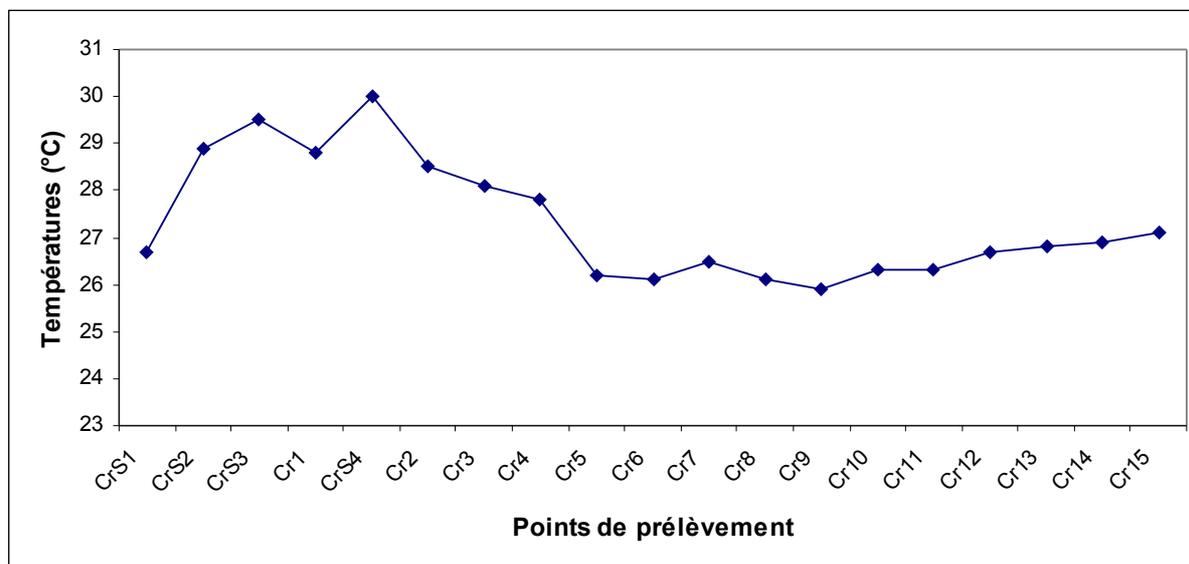
Paramètres	Minimum	Maximum
Température (°C)	26	30
pH	4,2	6,5
Conductivité (µS/cm)	13,4	54,3

#### V.1.1 Température

Dans le cours d'eau, la température des eaux varie entre 26°C et 30°C (**Tableau 1**).

Les températures les plus fortes s'observent sur le plateau (**fig. 16**) qui reçoit directement les rayons solaires contrairement à l'aval de la cascade qui est densément boisé et où la température peut descendre jusqu'à 22°C au niveau de la vasque.

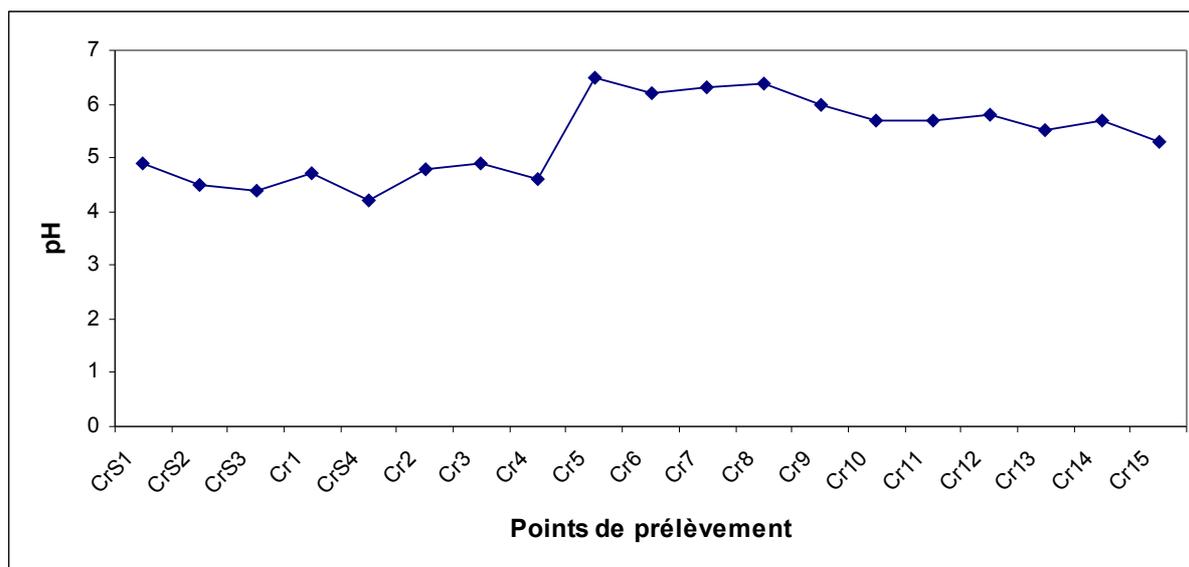
**Figure 16 : Variation de la température de l'eau le long du cours d'eau.**



### V.1.2 pH

Les eaux du cours d'eau présentent des pH acides à neutres (entre 4,2 et 6,5). L'étude de la variation du pH le long du cours d'eau (**fig. 17**) a montré que les faibles valeurs (variant autour de 5), se retrouvent sur le plateau. En aval de la cascade le pH s'élève et tend vers la neutralité.

**Figure 17 : Variation du pH le long du cours d'eau.**



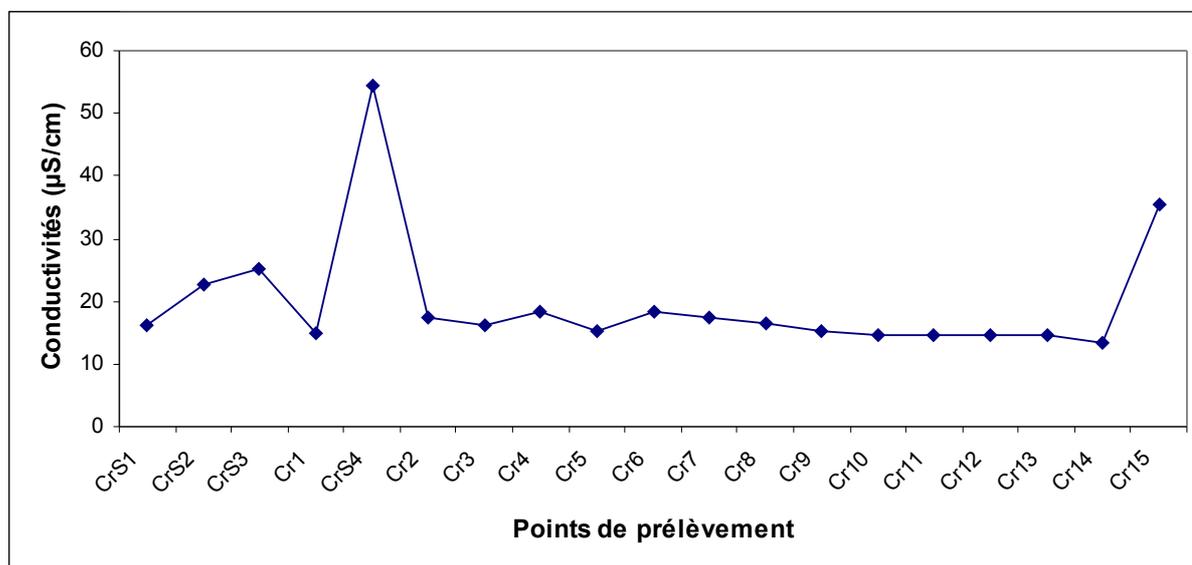
### V.1.2 Conductivité

Les valeurs de conductivité sont faibles dans le cours d'eau (entre 54.3 $\mu$ S/cm et 13.4 $\mu$ S/ en août 2006). Elles sont plus faibles que celles qui avaient été enregistrées pendant le période d'étiage en mai 2004 (**annexe III.2**).

La source CrS4 a donné pour cette étude-ci ainsi que pour celle effectuée en 2004, les valeurs de conductivité les plus élevées. On pense que cette source provient d'une nappe plus minéralisée que celles qui ont données les sources CrS1, CrS2, CrS3.

Sa distribution spatiale représentée à la **figure 18** indique qu'elle est légèrement plus élevée sur le plateau, au niveau de la vasque et plus en aval au niveau du point Cr15. Des activités anthropiques ont été notées à ces endroits.

**Figure 18 : Variation de la conductivité le long du cours d'eau.**



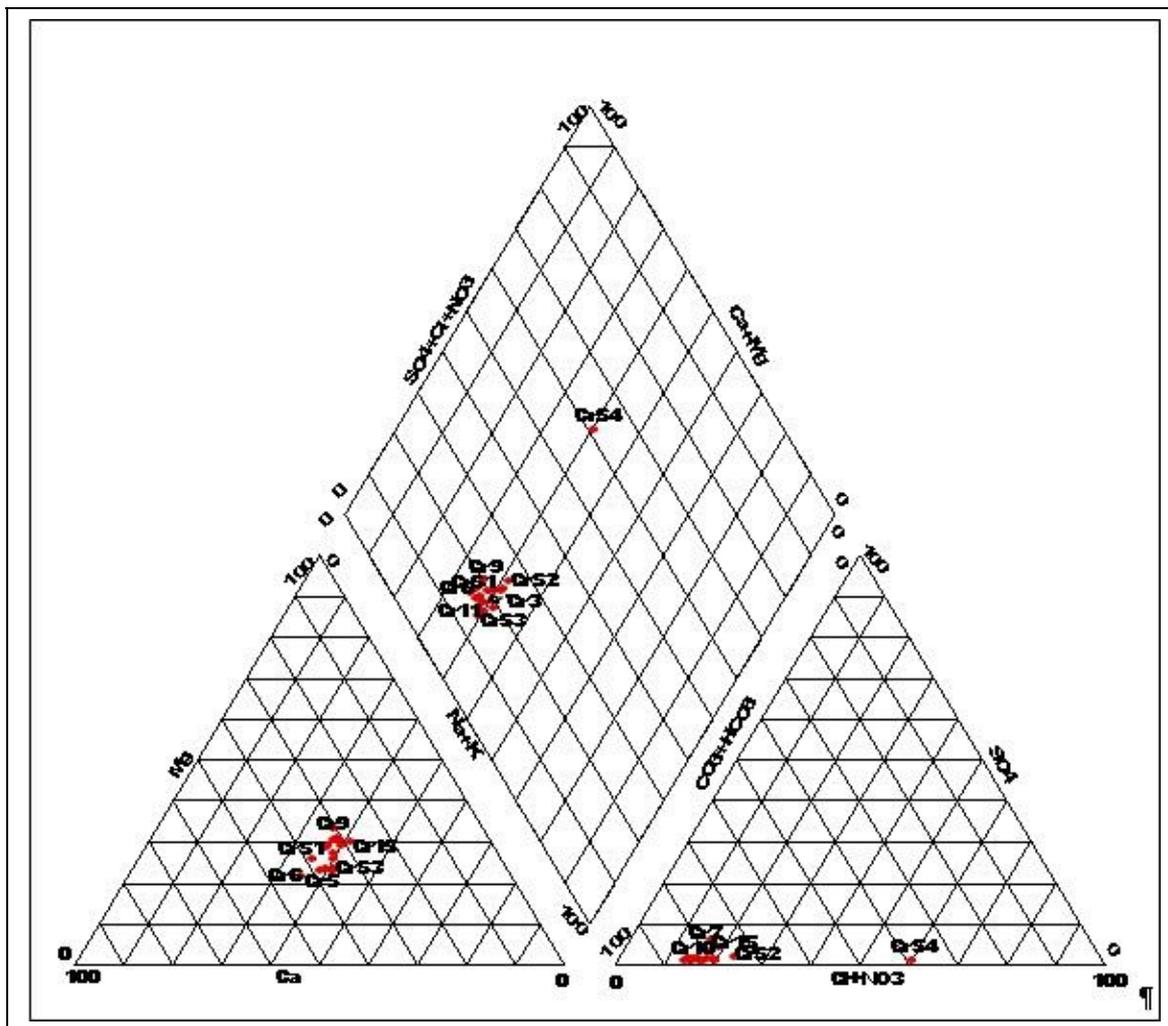
## V.2 Paramètres chimiques des eaux du cours d'eau

### V.2.1 Faciès géochimiques

La représentation des échantillons analysés sur le diagramme de Piper (**figure 19**) montre que dans le cours d'eau il y'a deux familles d'eau : des eaux bicarbonatées calciques largement prédominantes ; et chlorurées calcique au niveau de la source CrS4.

La comparaison avec les eaux de la période d'été (mai 2004 : **annexe V (a)**) montre une qualité chimique très hétérogène du cours d'eau pendant cette période d'été avec quatre types de faciès : bicarbonaté calcique, bicarbonaté sodique, chloruré calcique et chloruré sodique. Cette hétérogénéité en période de basses eaux s'explique par des phénomènes de concentration dus la forte évaporation mais aussi par la forte activité humaine et animale au niveau de la rivière.

Figure 19 : Diagramme de Piper des eaux du cours d'eau (août 2006).



### V.2.2 Les éléments majeurs

Les teneurs en éléments chimiques sont résumées dans le **tableau 1**. Celui-ci montre que les eaux du cours d'eau sont très faiblement minéralisées. La minéralisation est par ailleurs dominée par les ions bicarbonates.

**Tableau 2 : Teneurs en ions (m/l) des eaux du cours d'eau (Saison des pluies)**

Ions majeurs	Teneurs en ions majeurs (mg/l)		
	Maximum	Minimum	Moyenne
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	19,82	10,67	15,08
Ca <sup>2+</sup>	2,4	1,17	1,53
Na <sup>+</sup>	2,22	1,15	1,49
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	12,68	0,08	1,63
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0,67	0,04	0,23
K <sup>+</sup>	1,8	0,56	0,80
Mg <sup>2+</sup>	0,97	0,48	0,72
Cl <sup>-</sup>	2,24	1,10	1,33

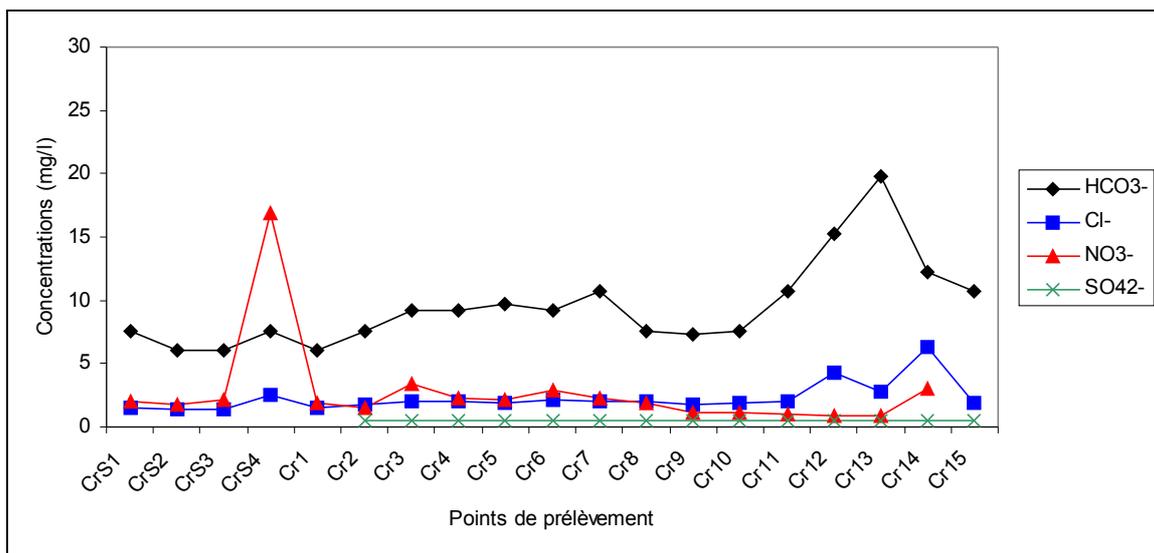
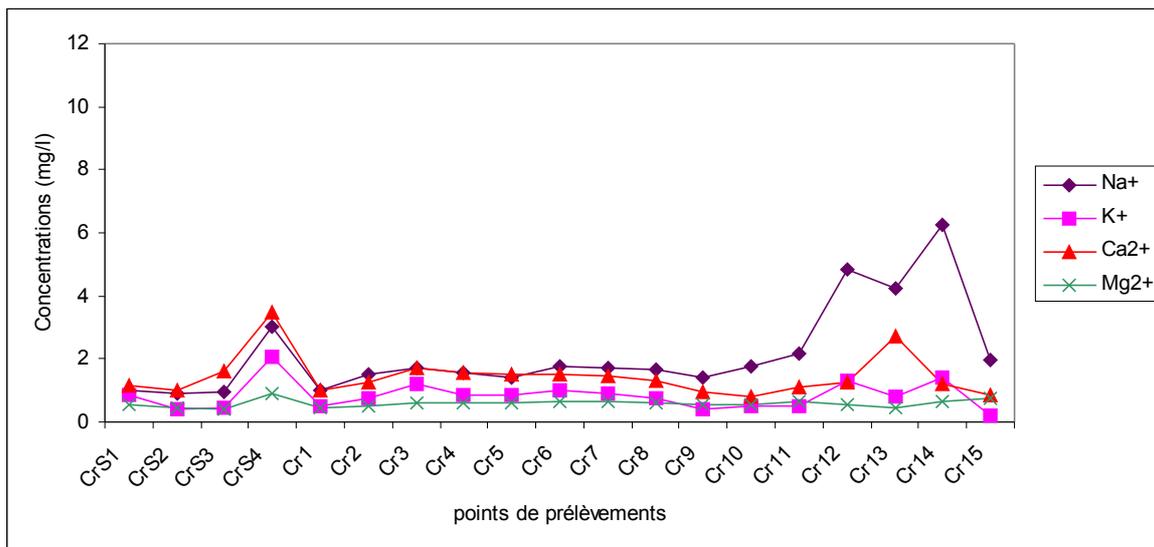
Comparativement aux analyses faites lors de la saison sèche en mai 2004 (**annexe III.3**), les concentrations en éléments chimiques sont légèrement plus élevées durant cette dernière. Ce phénomène de concentration est lié à l'évaporation mais surtout au fait que durant la saison sèche, les activités autour du cours d'eau sont plus importantes.

Le profil d'évolution des concentrations en ions majeurs le long du cours représenté à la **figure 20** et à la **figure 21** montre une augmentation des teneurs en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, et Ca<sup>2+</sup> vers l'aval pendant la saison sèche. Les teneurs en Mg<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup> restent faibles.

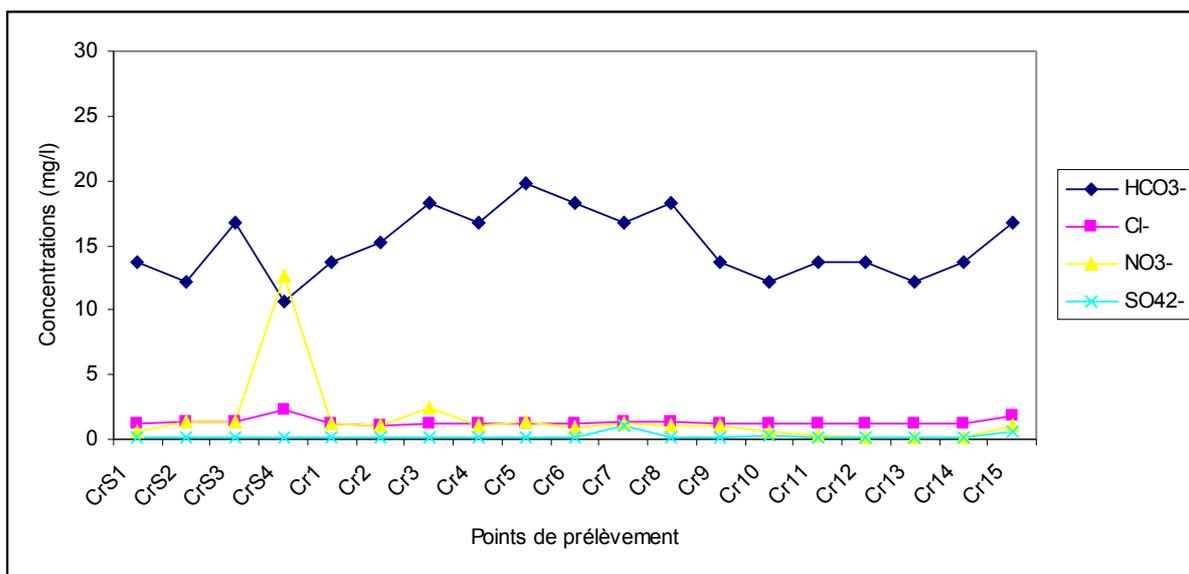
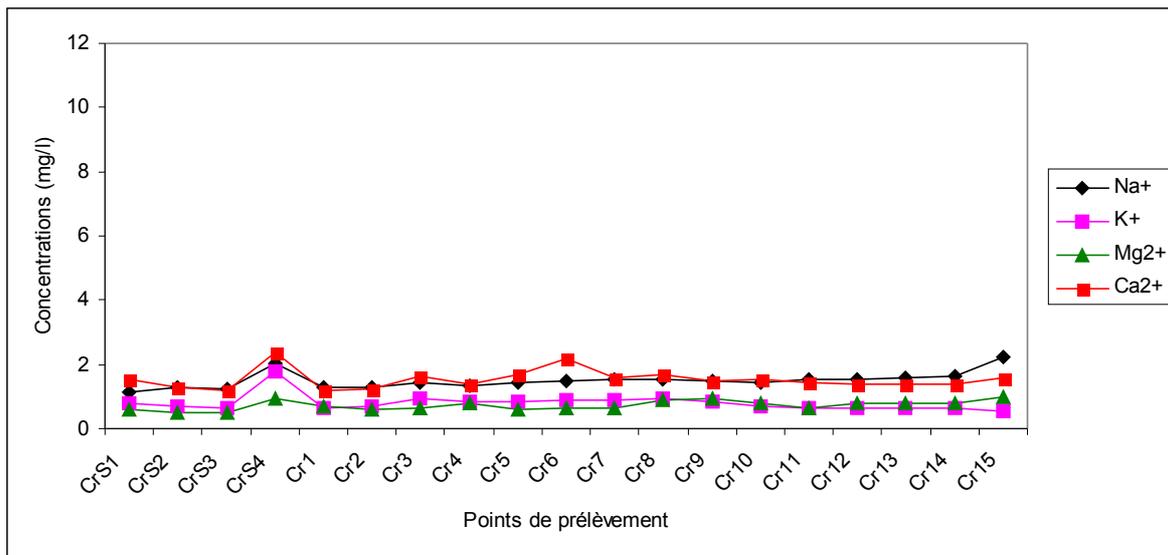
Pendant l'hivernage par contre, les concentrations en ions sont très faibles. La minéralisation des eaux diminue du fait d'une part, de la dilution par les eaux de pluies, mais également du fait que durant cette période, les activités autour du cours d'eau sont presque inexistantes car les puits étant de nouveau en eau, les villageois vont rarement jusqu'au cours d'eau pour leurs activités domestiques.

On note cependant durant cette période, que la minéralisation en amont sur le plateau est légèrement plus élevée. En Effet, le village de Dandé qui se trouve sur le plateau ne disposant pas de puits, ces habitants continuent à utiliser la partie amont du cours d'eau pour leurs activités de lavage ; ce qui entraîne donc cette légère élévation de la minéralisation par rapport à l'aval.

**Figure 20 : Variation des éléments chimiques le long du cours d'eau (saison sèche).**



**Figure 21 : Variation des éléments chimiques le long du cours d'eau (hiver).**



Il faut noter la minéralisation particulière de la source CrS4 par rapport au reste du cours d'eau. Elle présente des teneurs plus élevées pour tous les ions. On pense mais cela reste à vérifier que cette source serait le point d'émergence d'une nappe contenue dans les termes pélitiques.

### V.2.3 Eléments mineurs et traces

Les éléments mineurs et traces sont présents dans les eaux à des concentrations très faibles. Certains sont des constituants naturels des eaux, d'autres par contre sont très toxiques et une faible quantité peut rendre une eau impropre à la consommation. Aucun de ces éléments n'ayant encore jamais été mesuré, nous avons jugé nécessaire de voir la teneur de certains d'entre eux dans les eaux.

Des contraintes financières et techniques ont fait qu'une large gamme de ces éléments n'a pu être étudié. Pour le cours d'eau, les mineurs ont été dosés surtout au niveau des sources les plus utilisées (CrS3 et Cr15), au niveau de la vasque et en deux autres stations sur le plateau (Cr1) et vers l'aval (Cr11). Pour la nappe, les points sont choisis de manière à avoir une bonne dispersion.

Les éléments qui ont été dosés sont : Cu, Zn, Ni, Pb, P, Br, Cr, Fe, F dont Le tableau 4 montre les concentrations dans les eaux du cours d'eau, ainsi que le nitrate qui lui, a été dosé sur l'ensemble des échantillons.

**Tableau 3 : Concentrations en éléments mineurs et traces dans le cours d'eau**

Concentrations éléments mineurs et traces de la nappe (mg/l)									Plomb (µg/l)
Points	Cuivre	Zinc	Nickel	Fluor	Phosphore	Brome	Chrome	Fer	
CrS3	0	0,0059	0	0	0,386	0	0	5,3	0
Cr1	0	0,0063	0	0	0,421	0	0	6,2	3,6
Cr6	0	0,0074	0	0	0,434	0	0	6,7	8,2
Cr11	0	0,0074	0	0	0,446	0	0	5,9	6,2
CrS5	0	0,0075	0	0	0,468	0	0	60	7,1

### V.4 Paramètres chimiques organiques : DBO et DCO

La DBO<sub>5</sub> exprime la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder par voie biologique (c'est-à-dire par des bactéries normalement présentes dans les eaux), les matières organiques de l'eau. Elle renseigne sur la capacité d'autoépuration des eaux.

La DCO elle, exprime la quantité d'oxygène dissous nécessaire pour oxyder par voie chimique, sans intervention d'êtres vivants, toutes les substances oxydables (sels minéraux oxydables, composées organiques biodégradables ou non etc).

La DBO<sub>5</sub> et la DCO ont été mesurées au niveau des sources et de la vasque afin de détecter une éventuelle pollution organique. Les résultats sont reportés dans le **tableau 5**.

**Tableau 4 : DBO5 et DCO des eaux du cours d'eau**

Points de prélèvement	DBO5 (mg/l oxygène)	DCO (mg/l d'oxygène)
CrS3	00	68
CrS4	00	64
Cr6	00	84
Cr15	00	76

Ces résultats traduisent une bonne autoépuration des eaux avec des valeurs de DBO<sub>5</sub> nulles.

On note cependant, l'importance des matières organiques non biodégradables.

### V.5 Bactériologie

Les analyses bactériologiques sont effectuées au niveau des sources où sont prélevées les eaux de boisson et au niveau de la vasque, principal lieu de baignade. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 5 : Teneurs en germes indicateurs de la pollution fécale cours d'eau**

Points de prélèvement	Germes totaux (/100ml)	Coliformes fécaux (/100ml)	Coliformes totaux (/100ml)	Streptocoques (/100ml)
CrS3	23000	200	1700	00
CrS4	27000	1200	1500	00
Cr6	180000	3900	17000	00
Cr15	11000	500	500	00

Ces résultats indiquent une contamination fécale du cours d'eau.

### V.6 Paramètres physiques des eaux de la nappe

**Tableau 6 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe**

Paramètres	Minimum	Maximum
Température (°C)	30,2	32,4
pH	4,3	7,1
Conductivité (µS/cm)	24,3	399

#### V.6.1 Température

Dans la nappe la température de l'eau varie entre 30,2°C et 32,4°C. (**Tableau 3**). Ces valeurs de température sont très proches de celles de l'air ambiant ce qui témoigne de l'ouverture du système par rapport au milieu extérieur.

La **figure 22** qui représente la variation spatiale de la température dans la nappe, montre une distribution relativement homogène avec une influence notable (dans le sens d'une diminution) du cours d'eau sur les puits qui lui sont proches.

### V.6.2 pH

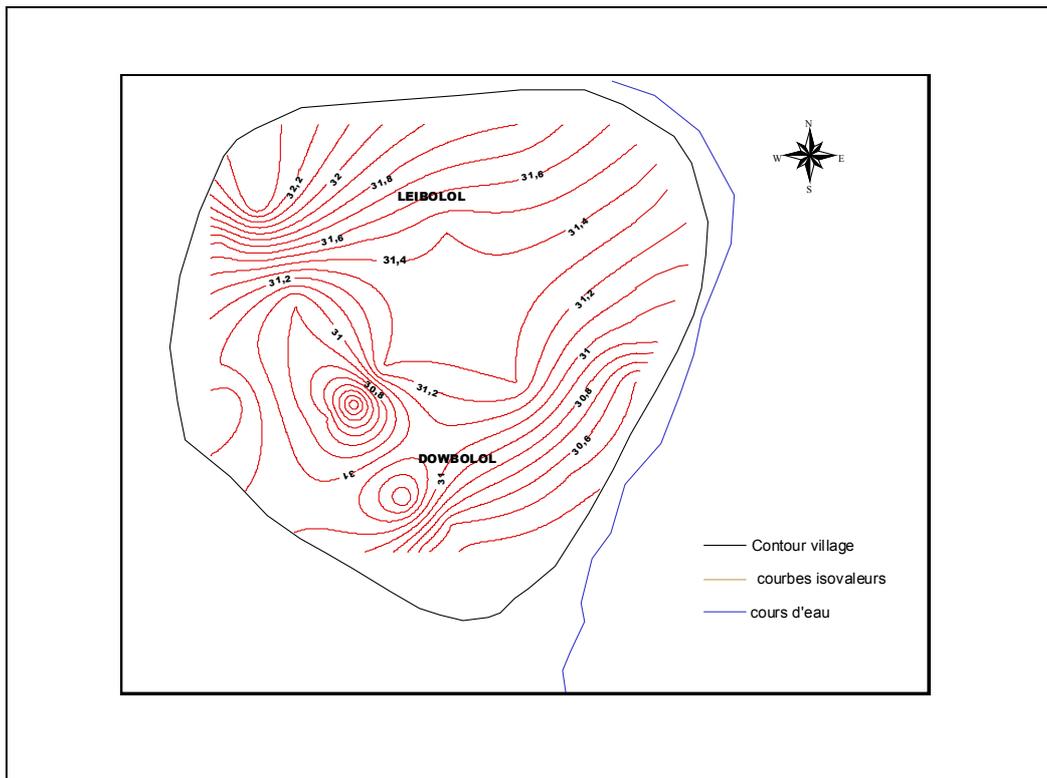
Les eaux de la nappe sont également acides avec des valeurs de pH variant entre 4,3 et 7,1. Ces faibles valeurs qui confèrent à la nappe son caractère acide pourraient s'expliquer par la nature silicatée du réservoir des altérites. Leur distribution (**fig.23**) dans la nappe est relativement homogène.

### V.6.3 Conductivité

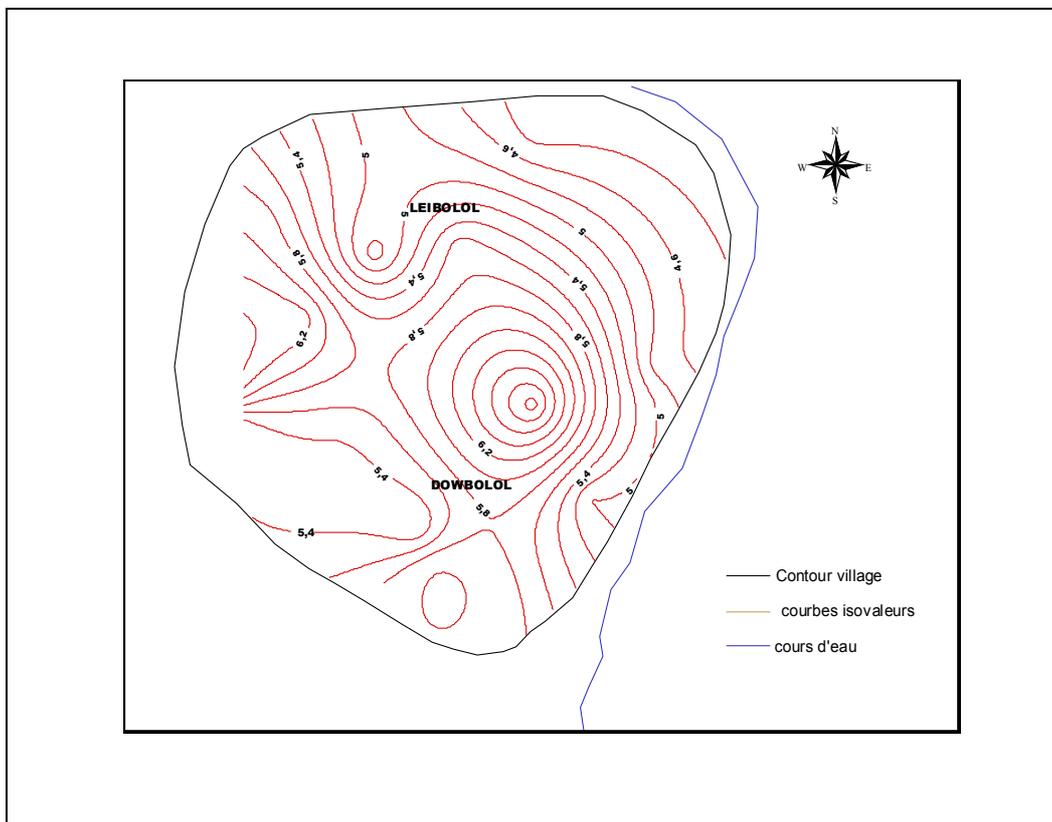
Au niveau de la nappe les variations saisonnières de la conductivité sont bien marquées. La comparaison des valeurs de conductivité avec celles de la période d'été mai 2004 (**annexe III.1**) montre que la conductivité est fortement influencée par le régime saisonnier. Les valeurs relativement plus élevées en période d'été diminuent en saison des pluies à cause de la dilution par ces dernières.

Par ailleurs, la carte de répartition de la conductivité (**fig. 24**) des eaux de la nappe montre une augmentation des valeurs à partir du cours d'eau suggérant ainsi un phénomène de dilution de celle-ci par le cours d'eau.

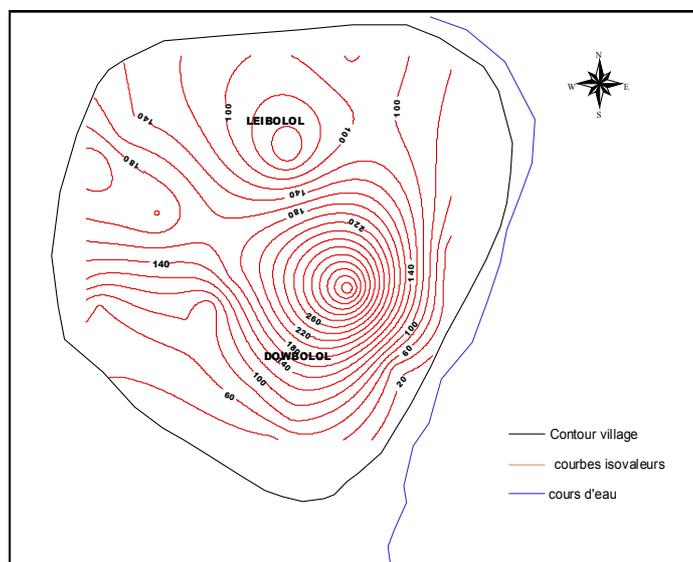
**Figure 22 : Distribution spatiale de la température des eaux de la nappe.**



**Figure 23 : Distribution spatiale des pH des eaux de la nappe.**



**Figure 24 : Distribution spatiale de la conductivité des eaux de la nappe.**

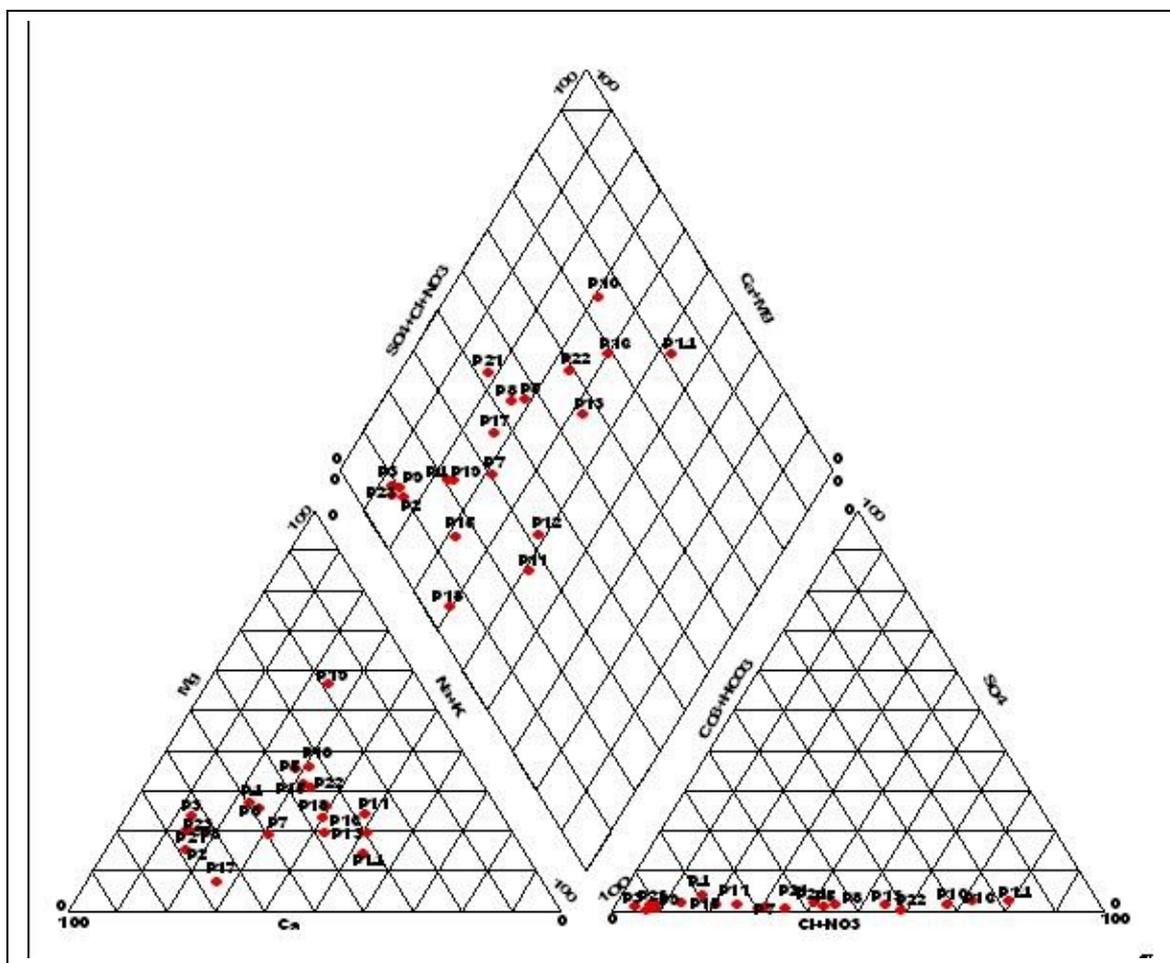


## V.7 Paramètres chimiques de la nappe

### V.7.1 Faciès géochimiques des eaux de la nappe

La nappe présente trois types de faciès (**fig.25**) : bicarbonaté calcique, chloruré calcique (qui constituent les faciès dominants), et le faciès chloruré sodique et sulfaté retrouvé dans le puits P14. En période d'été par contre, on avait trouvé dans la nappe (**annexe V (b)**) que les faciès bicarbonatés. Ici la dilution par les apports pluviaux semble entraîner une recomposition chimique qui pourrait s'expliquer par des phénomènes d'adsorption et d'échanges de cations.

Figure 25 : Diagramme de Piper des eaux de la nappe (août 2006).



### V.7.2 Les éléments majeurs

Les teneurs moyennes en éléments chimiques des eaux de la nappe consignées dans le **tableau 6** montrent des eaux faiblement à moyennement minéralisées

Tableau 7 : Teneurs en ions majeurs (mg/l) de la nappe (Saison des pluies 2006)

Ions majeurs	Teneurs en ions majeurs (mg/l)		
	Maximum	Minimum	Moyenne
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	250,1	12,2	53,37
Ca <sup>2+</sup>	30,2	1,38	10,62
Na <sup>+</sup>	27	2,3	5,07
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	40,88	0,34	12,25
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	2,33	0,08	0,76
K <sup>+</sup>	4,52	0,24	2,47
Mg <sup>2+</sup>	9,81	1,12	3,01
Cl <sup>-</sup>	5,57	1,34	3,66

Par ailleurs, la bonne corrélation notée entre d'une part les ions bicarbonates et la conductivité, et d'autre part, entre les ions calcium et la conductivité (**figure 26 et 27**) montre que la minéralisation est dominée comme pour le cours d'eau par les ions bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et dans une moindre mesure par les ions calcium (Ca<sup>2+</sup>). On comprend donc que les eaux de la nappe soient dominées par le faciès bicarbonaté calcique. Ces teneurs sont légèrement plus faibles en comparaison de celles enregistrées en mai 2004(**annexeIII.4**) en saison sèche traduisant une dilution par les eaux de pluies.

### V.7.3 Eléments traces et mineurs

**Tableau 8 : Concentrations en éléments mineurs et traces dans la nappe**

Concentrations éléments mineurs et traces de la nappe (mg/l)									Plomb ( $\mu\text{g/l}$ )
Echantillons	Cuivre	Zinc	Nickel	Fluor	phosphates	Brome	Chrome	Fer	
P3	0	0,0075	0	0	0,452	0	0	7,7	8,6
P7	0	0,0082	0	0	0,478	0	0	10,1	6,5
P10	0	0,0068	0	0	0,421	0	0	10,5	5,5
P11	0	0,0074	0	0	0,425	0	0	13,4	5,3
P14	0	0,0072	0	0	0,435	0	0	11,6	8,6
P15	0	0,0072	0	0	0,449	0	0	15,7	8

Les teneurs en Zn, P et Pb sont comparables à celle retrouvées dans le cours d'eau. On remarque par ailleurs que le fer est présent à des concentrations relativement importantes.

**Figure 26 : Diagramme binaire ions  $\text{HCO}_3^-$  / conductivité de la nappe.**

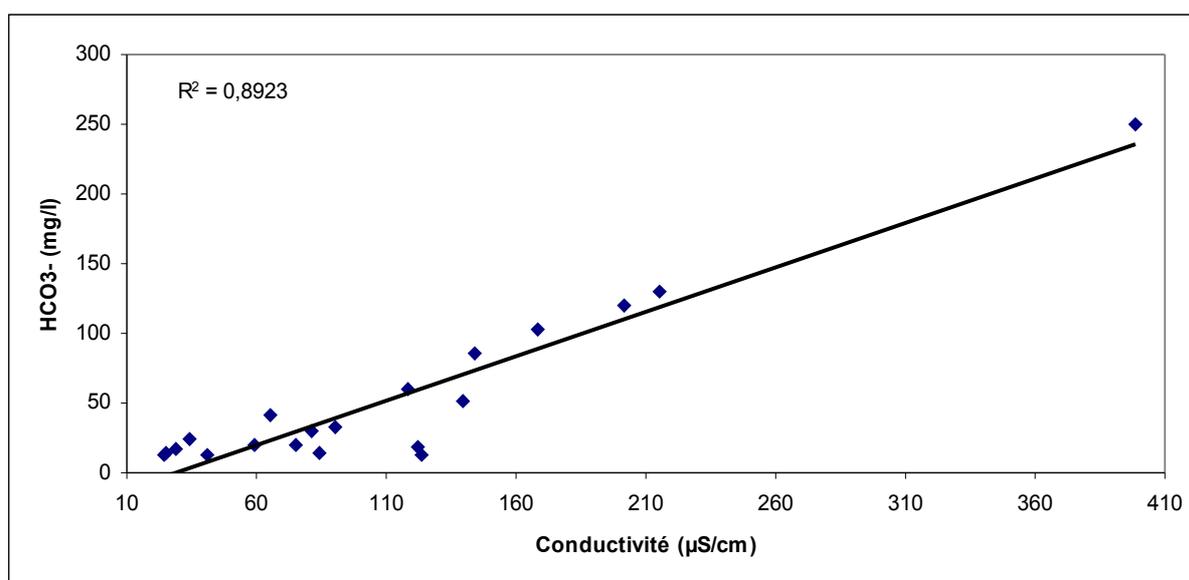
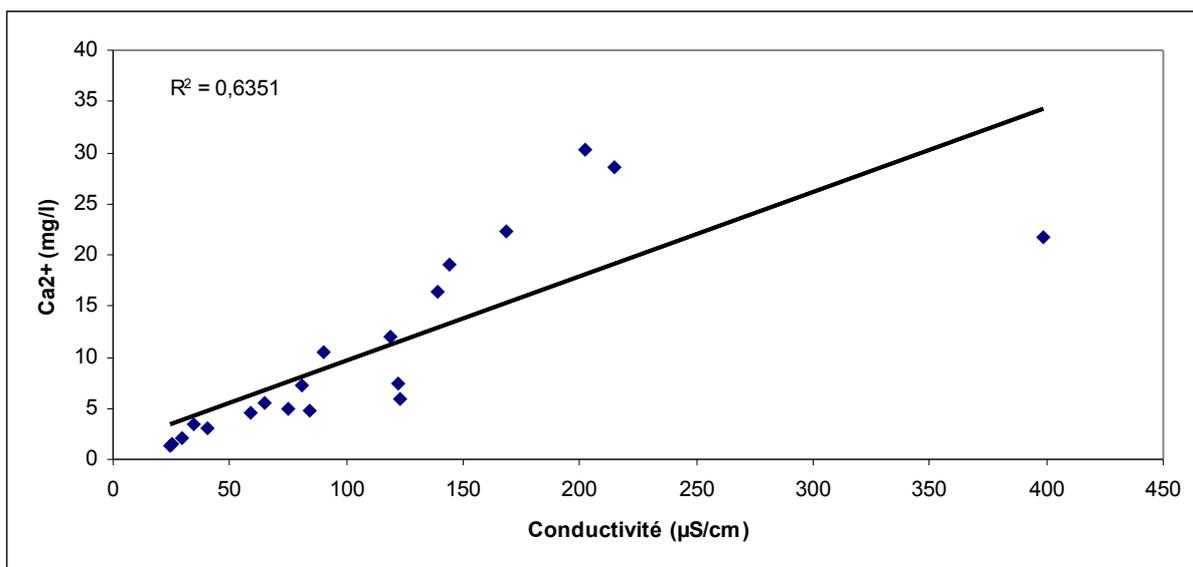


Figure 27 : Diagramme binaire ions  $\text{Ca}^{2+}$ / conductivité de la nappe.



## **V.8 Piézométrie et Relation Nappe/Cours d'eau**

Dans cette partie nous allons essayer de voir comment se fait la recharge de la nappe ainsi que les différents sens de son écoulement. Faute d'équipements et de moyens nécessaires, il nous a été impossible de réaliser les pompages d'essai qui permettraient de suivre le comportement de la nappe et de déterminer les paramètres hydrodynamiques (transmissivité, conductivité hydraulique et coefficient d'emménagement) de l'aquifère des altérites.

### **V.8.1 Bathymétrie de la surface de la nappe**

La comparaison des mesures de niveaux statiques de la nappe dans le cadre de cette étude avec celles réalisées pendant la période 2003-2004 (**annexe VII**) montre d'une part, que pendant les saisons sèches, la plupart des puits sont à sec (tarissent complètement), d'autre part, que le niveau du plan d'eau est plus faible en fin août début septembre (milieu de la saison des pluies où le niveau peut être  $<1\text{m}$ ) qu'en fin juillet début août. Ceci montre qu'il y'a une importante recharge de la nappe par les eaux de pluies. Pendant la saison sèche par contre, la nappe devient plus profonde. En effet, durant cette période, sous l'effet d'une forte évaporation qui atteint  $10,3\text{ mm}$  la nappe atteint son niveau le plus bas et les puits qui restent exploitables offrent de très faibles débits. Les effets de l'évaporation sont en outre accentués par les prélèvements des populations ce qui aboutit au tarissement de la majorité des puits dès le début du mois de février.

La représentation spatiale des variations du niveau statique de la nappe (**fig. 28**) montre que celle-ci est moins profonde (moins de  $3\text{m}$ ) à l'Est du village aux abords du cours d'eau. Elle s'approfondit quand on s'éloigne vers l'intérieur des terres à l'Ouest (environ  $10\text{m}$ ), et au Sud au niveau de Dowbolol avec des profondeurs dépassant  $12\text{m}$ . Cette répartition suggère une alimentation de la nappe par le cours d'eau.

### **V.8.2 Distribution spatiale des niveaux piézométriques de la nappe**

A l'aide de calculs de niveau d'eau effectués à partir du nivellement des puits, une esquisse piézométrique de l'aquifère des altérites a été réalisée. Elle permet de distinguer un sens d'écoulement global de l'Est vers l'Ouest (**fig.29**). Les courbes Isopièzes varient de  $182\text{m}$  d'altitude au sud-est à  $162\text{m}$  au nord-ouest. Cette distribution confirme la recharge latérale de la nappe à partir du cours d'eau.

Figure 28 : Variation spatiale des niveaux statiques (m) de la nappe.

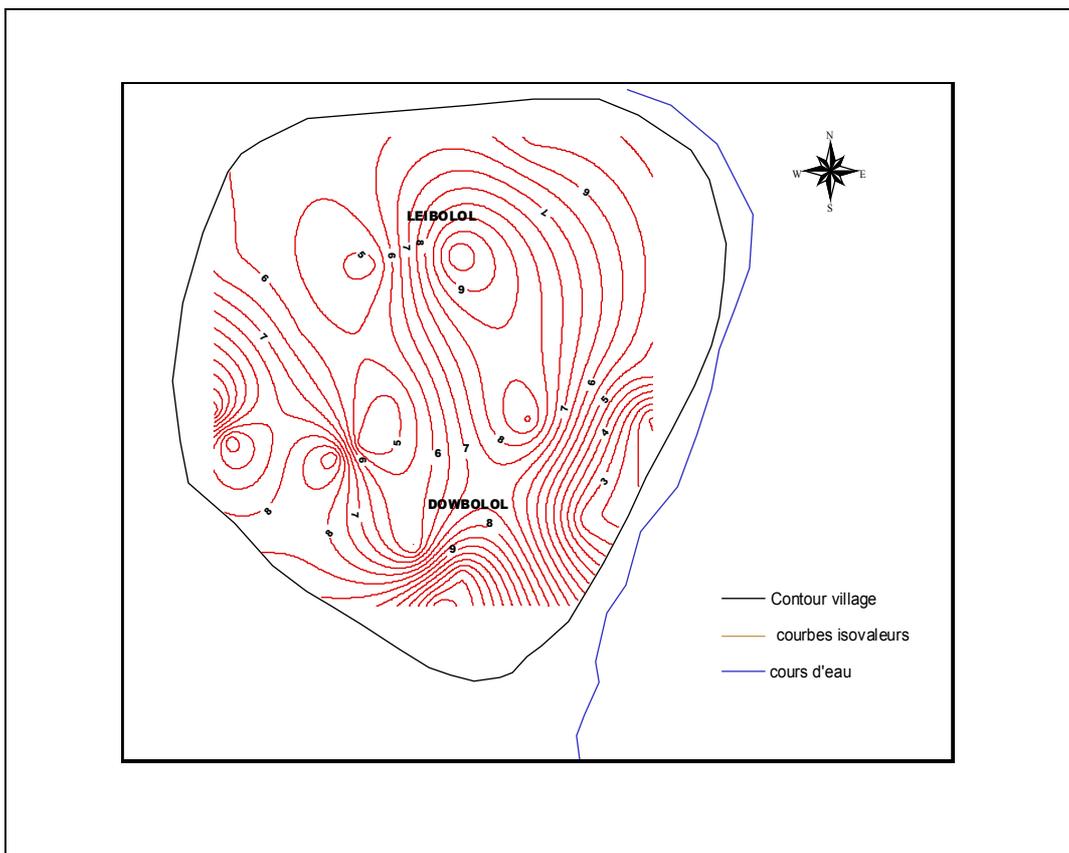
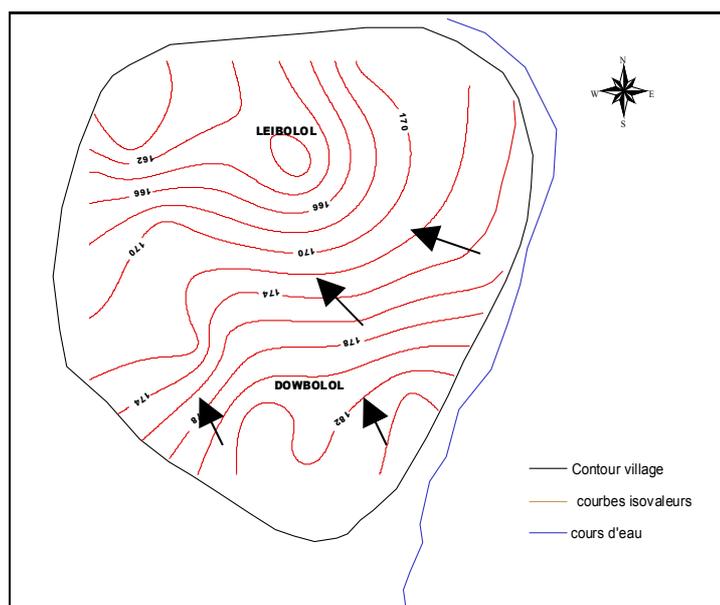
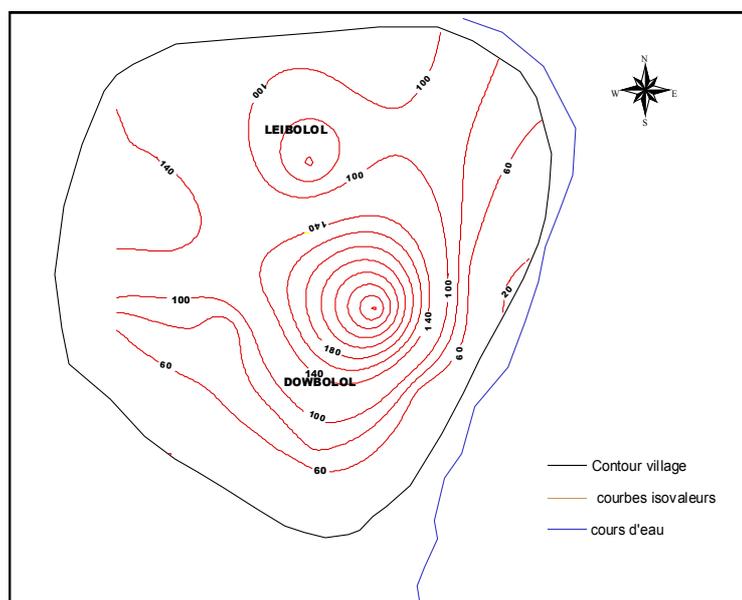


Figure 29 : Variation spatiale du niveau piézométrique (m) de la nappe.



Par ailleurs, la répartition spatiale de la minéralisation globale (somme des anions et des cations) de la nappe (**figure 30**) indique une plus faible minéralisation dans les puits situés aux abords du cours d'eau. La minéralisation augmente par la suite en direction du centre du village. Il y'a donc une dilution des eaux de la nappe par celles moins minéralisées du cours d'eau. Ce qui confirme l'hypothèse de la recharge de la nappe par le cours d'eau.

**Figure 30 : Variation spatiale de la minéralisation totale des eaux de la nappe.**



## V.9 Bactériologie

L'analyse bactériologique au niveau de la nappe a révélé également une pollution fécale avec de fortes concentrations en germes indicateurs. Le **tableau 8** présente les teneurs en coliformes et Streptocoques en quelques puits.

**Tableau 9 : Teneurs en germes indicateurs de la pollution fécales dans la nappe**

Points de prélèvement	Germes totaux (/100ml)	Coliformes fécaux (/100ml)	Coliformes totaux (/100ml)	Streptocoques (/100ml)
P3	2800000	7800	12000	200
P15	3800000	43000	44000	1600
P18	1500000	12000	19000	1200

### Conclusion

Les eaux sont d'une manière générale faiblement minéralisées avec des variations spatiales et saisonnières. Dans le cours d'eau elles présentent une minéralisation plus élevée dans les endroits où des activités domestiques sont notées. Au niveau de la nappe les variations spatiales montrent une dispersion qui laisse supposer une dilution par le cours d'eau.

La relation entre les deux systèmes se traduit par une recharge de la nappe par le cours d'eau. Ce qui signifie que toute pollution de ce cours d'eau finira à long terme par se répercuter sur la nappe. Cependant le principal mode de recharge de la nappe est plutôt la recharge par les eaux de pluies pendant l'hivernage. En saison sèche le niveau de la nappe devient très bas du fait de la forte évaporation.

## CHAPITRE VI : DISCUSSIONS

### VI.1 Origine de la minéralisation des eaux

La comparaison des teneurs moyennes en  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  des eaux des pluies à la station de Kédougou et celles des eaux de la zone montre un enrichissement de ces dernières (**tableau 9**) en éléments chimiques. En dehors des apports météoriques, d'autres phénomènes participent donc à la minéralisation des deux systèmes (nappe et cours d'eau).

**Tableau 9 : Comparaison des teneurs moyennes en ions majeurs des eaux avec celles des eaux de pluies de la station de Kédougou**

Eléments chimiques (mg/l)	Cours d'eau	Nappe	Eaux de pluies à la station de Kédougou (Yves Travy)
$\text{HCO}_3^-$	15,08	53,37	8,29
$\text{Ca}^{2+}$	1,53	10,62	2,76
$\text{Na}^+$	1,49	5,07	0,57
$\text{SO}_4^{2-}$	0,23	0,76	0,64
$\text{K}^+$	0,8	2,47	0,46
$\text{Mg}^{2+}$	0,72	3,01	0,18
$\text{Cl}^-$	1,33	3,66	1,52

Les bicarbonates constituent avec le calcium les ions majeurs qui définissent les familles d'eaux de la zone.

L'origine des bicarbonates est à rechercher essentiellement dans la dissolution du  $\text{CO}_2$ . En effet, les eaux du cours d'eau étant en contact permanent avec l'atmosphère, le  $\text{CO}_2$  atmosphérique diffuse très facilement à la surface. Il en est de même pour les eaux de la nappe qui est une nappe libre. Dans l'eau ce  $\text{CO}_2$  se dissocie et apporte des ions  $\text{HCO}_3^-$  selon les réactions suivantes :



Par ailleurs, durant cette période de premières pluies, les processus d'oxydation de la matière organique sont importants. Ces processus sont favorisés par la prolifération des bactéries qui accompagne la ré humidification des horizons pédologiques et de la zone non saturée en général.

La réaction globale de cette destruction de la matière organique s'écrit :



Il y'a donc production de quantités importantes de  $\text{CO}_2$  dont une bonne partie passe dans l'eau où il se dissocie suivant les mêmes réactions (1) et (2) apportant également des ions  $\text{HCO}_3^-$ .

La faible minéralisation des eaux de la nappe est liée à la nature du réservoir silicaté des altérites. Dans ce réservoir essentiellement granitique, l'action physico-chimique de l'eau entraîne des phénomènes d'hydrolyse. L'altération des granites consiste essentiellement en altération des feldspaths qui libèrent successivement le sodium, le calcium puis le potassium le silicium et le fer. Une fois libérés, la plus grande partie de ces minéraux évolue de façon rapide sur place donnant des argiles de néoformation comme la Kaolinite (DUCHAUFOR 88). Mais ces phénomènes se font de manière très lente.

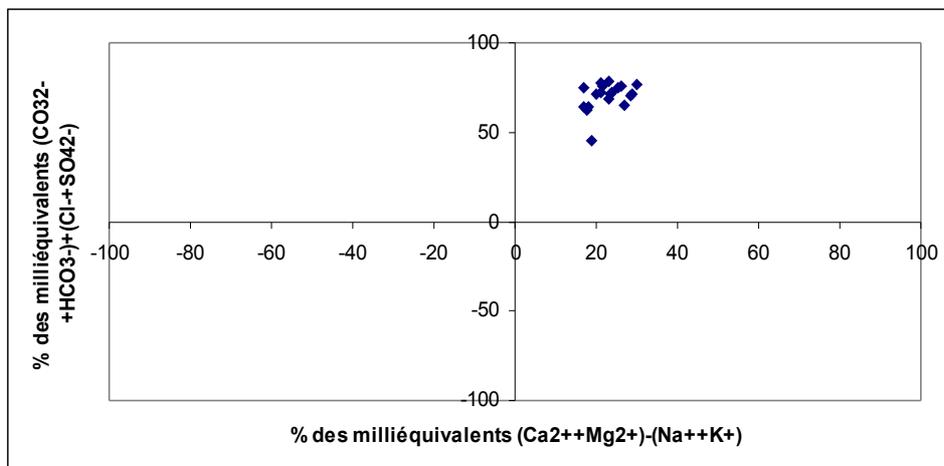
Dans le cours d'eau, la minéralisation est très faible du fait de l'écoulement qui réduit le temps de contact avec les roches qui forment son lit. Les légers pics observés aux endroits les plus fréquentés sont dus aux activités de lessive, toilette et lavage qui s'y développent.

#### **Comportement des eaux dans le diagramme de Chadha**

Reportés dans le diagramme de Chadha (**fig. 31**), les résultats mettent en évidence d'autres phénomènes qui concourent à la composition des eaux.

Dans ce diagramme, les eaux du cours d'eau se trouvent dans le champ 5 où les alcalino-terreux ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) et les anions d'acides faibles ( $\text{HCO}_3^-$ ) dominant à la fois les métaux alcalins ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) et les anions d'acide fort.

**Figure 31 : Diagramme de Chadha : processus de la minéralisation des eaux du cours d'eau.**



Les coefficients de corrélation entre les ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{2+}$  (0,007) et entre  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Mg}^{2+}$  (0,048) (**annexe VI**) très faibles témoignent des origines différentes des alcalino-terreux et des ions bicarbonates.

L'application de la formule de l'IEB (indice d'échange de bases) sur les données de l'analyse chimique (**annexe IV**) donne des valeurs d'IEB  $< 0$ , ce qui veut dire qu'il se produit des phénomènes d'échanges de base (les ions  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Ca}^{2+}$  sont échangés contre les ions  $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$  des roches du lit du cours d'eau). Ces phénomènes d'échanges interviennent dans la minéralisation des eaux étudiées à cause de la présence des argiles et de la matière organique qui forment le complexe absorbant.

Pour les eaux de la nappe (**fig.32**), la majorité des points se retrouvent dans le champ 5 comme pour le cours d'eau mettant en évidence les mêmes phénomènes. Il s'agit essentiellement d'eaux de recharge.

**Figure 32 : Diagramme de Chadha : processus de la minéralisation des eaux de la nappe.**

On a cependant, un puits qui se retrouve dans le champ 8. Champ qui met en évidence un phénomène d'échange de base inverse entraînant un apport de  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'eau.

Le puits qui se retrouve dans le champ 7 quant à lui met en évidence des eaux de type NaCl indiquant un mélange avec des eaux salées. Le site étant très éloigné de la mer, on pense qu'il s'agirait d'un mélange avec des eaux fossiles salées vu l'impossibilité d'une intrusion d'eau marine ou d'effets d'embruns marins.

Les éléments traces sont en dehors des nitrates et du plomb absents ou en très faibles concentrations (Zn et P dont les concentrations sont  $<1\text{mg/l}$ ).

Les nitrates sont présents dans le cours d'eau en des concentrations faibles variant entre  $0,08\text{mg/l}$  et la valeur maximale de  $12,68\text{mg/l}$  retrouvée à la source CrS4 sur le plateau. Ces faibles concentrations sont dues principalement au fait que dans les eaux de surface les nitrates sont absorbés par les plantes.

Dans la nappe, les teneurs en nitrate sont plus importantes (varient entre  $0,34\text{mg/l}$  et  $40,88\text{mg/l}$ ). Les concentrations les plus élevées ont été retrouvées dans les puits P14 ( $40,88\text{mg/l}$ ), P10 ( $38,03\text{mg/l}$ ), P16 ( $20,47\text{mg/l}$ ) et P17 ( $20,4\text{mg/l}$ ). Ces puits sont tous localisés dans des champs. L'épandage d'excréments azotés (fumiers), d'engrais (urée, NPK) et la décomposition de la matière organique (lors du retournement des sols, brûlis (COLLIN, 1987) pratiqués par les villageois en fin de saison sèche libèrent des quantités non négligeables de nitrates. Lors de la minéralisation de cette matière organique, sous l'action de bactéries chimio-autotrophes (Nitrosomonas et Nitrobacter), il y'a passage de l'azote organique en azote ammoniacal ( $\text{NH}_3$  et  $\text{NH}_4^+$ ) puis la transformation de l'ammonium en nitrate suivant les réactions :



Une partie de ce nitrate est absorbée par les plantes lors de leur croissance. Les nitrates en excès restent dans le sol et avec l'arrivée des pluies se déplacent vers la nappe à la faveur de la percolation des eaux d'infiltration. En conditions aérobies comme c'est le cas de la nappe libre des altérites, des quantités considérables peuvent percoler dans l'aquifère car ils sont très peu dégradés et dénitrifiés.

Par ailleurs, les nitrates peuvent avoir une origine plus ponctuelle liée aux activités domestiques (puisards, accès du bétail).

Le plomb est également bien représenté. C'est un constituant mineur répandu dans la croûte terrestre où on le retrouve sous forme de carbonates (cérusite), de phosphates (pyrophosphirite) mais surtout de sulfure (galène). Du fait de sa faible solubilité, il est peu présent dans les eaux naturelles.

Les concentrations en plomb retrouvées dans le cours d'eau varient entre 0 et 8,2 $\mu$ g/l et entre 5,3 et 8,6 $\mu$ g/l, dans la nappe. Ces teneurs assez élevées en plomb seraient liées surtout aux piles électriques usagers jetées un peu partout dans le village par les villageois eux même et par les visiteurs. Le village n'étant pas électrifié l'utilisation des lampes torche est très répandue ce qui génère d'importantes quantités de piles en plus de celles générées par la multitude de touristes (appareils photos et lampes torches). Depuis quelques temps il y'a une sensibilisation des villageois sur les méfaits de ces piles (libération de plomb particulièrement toxique pour les nourrissons et les enfants à bas âge) ainsi que les guides qui, au cours de leurs randonnées sensibilisent les touristes et ramassent celles éparpillées un peu partout.

## **VI.2 Usages et qualité des eaux**

Le cours d'eau ainsi que la nappe de Dindello sont exploités pour l'approvisionnement en eaux de boisson des populations. Le cours d'eau a une fonction supplémentaire dans la mesure où il est un lieu de baignade. Il est donc nécessaire que leur qualité aussi bien physico-chimique que bactériologique soit maîtrisée et sauvegardée.

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 1972), l'eau destinée à la consommation humaine ne doit contenir en quantités dangereuses, ni substances chimiques, ni germes nocifs pour la santé. En outre, elle doit aussi être agréable à boire.

Cette définition doit être traduite en termes permettant de déterminer si une eau est potable ou non. C'est là l'objet des normes de potabilité, approche quantitative de la notion qualitative de potabilité.

Afin de définir une eau potable, des valeurs guides ont été donc établies pour préciser les doses maximales admissibles pour une substance donnée correspondant à la quantité qu'un individu peut absorber sans danger tout le long de sa vie. Les valeurs dépendent étroitement des connaissances scientifiques et des techniques disponibles, notamment dans le domaine des risques sanitaires et dans celui des analyses chimiques. Elles peuvent donc être modifiées à tout moment en fonction des progrès réalisés.

Tout comme pour les eaux destinées à la consommation humaine, des normes de qualité pour les eaux de baignade ont été également établies dans un souci de protection de la santé des baigneurs. On s'est référé dans le cadre de cette étude à la directive européenne 76/160/CEE. Cette directive est basée sur la maîtrise du niveau de contamination fécale apprécié par la mesure des coliformes totaux et des coliformes fécaux. Elle ne prend en compte que les risques sanitaires issus de la contamination fécale.

**Usage domestique** : regroupe la lessive, le lavage, le nettoyage corporel etc. les analyses chimiques ont montré une eau très peu minéralisée (trop douce) dont l'inconvénient majeur est sa faculté limitée de rinçage. Elle ne permet pas parfois d'éliminer la totalité du savon lors de la toilette et la lessive et augmente à ce titre les risques d'irritation de la peau.

**Usage récréative** : baignade

Cet usage concerne essentiellement le cours d'eau. Les résultats du dénombrement des germes fécaux de la vasque, principal lieu de baignade de la zone sont comparés dans le **tableau 10** aux normes de qualité de la CEE.

**Tableau 10 : Cours d'eau et critères de conformité des eaux de baignade (directive 76/160/CEE du 8 décembre 1975).**

Indicateurs de pollution fécale	norme guide	norme impérative	valeur dans La vasque
Coliformes taux	500/100ml	10 <sup>4</sup> /100ml	17000/100ml
Coliformes fécaux	100/100ml	2.000/100ml	3900/100ml
Streptocoques fécaux	100/100ml	-	00/100ml

Source : Qualité et traitement des eaux. Groupe de recherche MHEA ; Université de Liège, Département Sciences et Gestion de l'Environnement.

Norme guide est une norme qu'il faut s'efforcer de respecter

Norme impérative est une norme à ne pas dépasser

A la date du 05 août 2006, les eaux de la vasque, principal lieu de baignade dépassent pour les coliformes fécaux et coliformes totaux la valeur impérative pour la baignade fixée par la directive. Cette contamination bactérienne provient essentiellement de la pollution directe ou indirecte des déchets divers ou des déjections humaines et animales. Son importance en cette période est due au début des crues qui effectuent un véritable lessivage de berges.

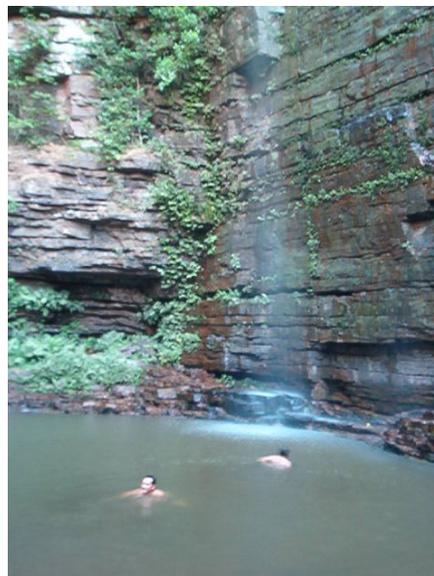
Les risques liés à la baignade dans de telles eaux sont surtout les risques d'ingestion de l'eau ou son contact avec la peau ou les muqueuses. Lorsque l'eau est ingérée au cours de la baignade, cela ramène au problème de l'eau d'alimentation. Mais la quantité d'eau ingérée est

beaucoup moins importante et donc le risque d'absorber des germes en quantité infectante est faible.

Néanmoins, le risque d'affections de la peau ou des muqueuses dues à des germes tels que les *Pseudomonas aeruginosa* ; et des voies respiratoires par les staphylocoques pathogènes, n'est pas à exclure.



**Ecoliers de Kédougou lors d'une excursion sur le site de Dindéfello**



**Baignade dans la vasque**

**Usage alimentaire :**

On entend par usage alimentaire la boisson et la cuisson. Il concerne aussi bien les eaux de la nappe que celles du cours d'eau (sources). La qualité des eaux de boisson est appréciée par les paramètres physico-chimiques et bactériologiques.

Les paramètres chimiques et bactériologiques mesurés dans le cadre de cette étude sont comparés dans les **tableaux 11 et 12** avec les normes de qualité édictées par l'OMS pour les eaux destinées à la consommation humaine.

**Tableau 11 : Normes de qualité OMS et ions majeurs des eaux du cours d'eau**

Paramètres	Valeurs guides (OMS 2000)	Unités	Concentrations maximales dans le cours d'eau
Minéralisation	<b>2000</b>	mg/l	51
Potassium	<b>12</b>	mg/l	1,8
Sodium (Na <sup>+</sup> )	<b>200</b>	mg/l	2,22
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	<b>100</b>	mg/l	0,97
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	<b>250</b>	mg/l	1,10
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	-	mg/l	0,67
Zinc (Zn <sup>+</sup> )	-	mg/l	0,0075
Phosphates (PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	-	mg/l	0,468
Fer	-	mg/l	60
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	<b>50</b>	mg/l	12,68
Plomb (Pb)	<b>0,01</b>	mg/l	8,2.10 <sup>-6</sup>

**Tableau 12 : Normes de qualité OMS et ions majeurs des eaux de la nappe**

Paramètres	Valeurs guides (OMS 2000)	Unités	Concentrations maximales dans la nappe
Minéralisation	<b>2000</b>	mg/l	286
Potassium	<b>12</b>	mg/l	4,52
Sodium (Na <sup>+</sup> )	<b>200</b>	mg/l	27
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	<b>100</b>	mg/l	9,81
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	<b>250</b>	mg/l	5,57
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	<b>400</b>	mg/l	2,33

Zinc (Zn <sup>+</sup> )	-	mg/l	0,0082
Phosphates (PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	-	mg/l	0,478
Fer (Fe)	-	mg/l	15,7
Nitrates	<b>50</b>	mg/l	40,88
Plomb (Pb)	<b>0,01</b>	mg/l	8,6.10 <sup>-6</sup>

Aussi bien pour la nappe que pour le cours d'eau, les constituants minéraux sont présents pour la plupart en des teneurs largement en dessous des valeurs guides recommandées par l'OMS pour les eaux de boisson.

Cependant, ceci ne veut pas forcément dire quelles sont potables car les normes chimiques pour l'eau de boisson peuvent être considérées comme d'importance secondaire dans la mesure où ils n'engendrent généralement pas d'effets aigus. Rares sont les constituants chimiques qui peuvent avoir des effets aigus sur la santé. Dans les cas où cela arrive par contamination accidentelle l'eau acquiert un goût ou une odeur qui ne donne pas à première vue envie de boire.

Le fer par contre surtout au niveau de la nappe et à Cr15 (cours d'eau) est présent à des teneurs qui dépassent largement la valeur 2mg/l considérée comme dose sans danger pour la santé (OMS 2000).

Les risques de contamination des puits par les nitrates sont réels, surtout dans les puits situés dans les champs. Ils sont accentués par la perméabilité en grand du réservoir qui fait que l'infiltration est rapide. L'écoulement des eaux dans la nappe est également rapide de sorte que des contaminations ponctuelles peuvent rapidement se généraliser.

Par ailleurs, même si les eaux (surtout les sources puisque ce sont elles qui servent pour la boisson) sont fraîches et claires leur trop faible minéralisation peut constituer une limite à leur propriétés nutritionnelles car l'eau de boisson en plus de ces aptitudes désaltérantes doit fournir des éléments minéraux en complément des aliments.

Contrairement aux polluants chimiques, les polluants bactériologiques peuvent avoir des effets aigus et souvent généralisés. Bien qu'il soit maintenant possible de détecter la présence de ces polluants bactériologiques (pathogènes), les méthodes de leur isolement et comptage sont longues et complexes. C'est pourquoi on recherche plutôt les indicateurs de pollution fécale, présents dans l'intestin de l'homme et des animaux à sang chaud. Leur présence indique qu'il y'a bien une pollution fécale et que les pathogènes intestinaux peuvent être aussi présents. Les différents indicateurs bactériens utilisés à cette fin sont comparés dans le **tableau 13** aux valeurs guides de l'OMS.

**Tableau 13 : Directives OMS et qualité microbiologique des eaux**

Points de mesure	Germes totaux (/100ml)	Coliformes fécaux (/100ml)	Coliformes totaux (/100ml)	Streptocoques fécaux (/100ml)
CrS3	23000	200	1700	00
CrS4	27000	1200	1500	00
Cr6	180000	3900	17000	00
Cr15	11000	500	500	00
P3	2800000	7800	12000	200
P15	3800000	43000	44000	1600
P18	1500000	12000	19000	1200
	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur
	Guide :	Guide :	Guide :	Guide :
		00	00	00

Ces résultats montrent une forte présence de germes. La présence de germes dans les puits peut être attribuée au fait que la nappe est libre et peu profonde ce qui augmente sa vulnérabilité par rapport aux apports de germes issus des déjections humaines et animales. Pour le cours d'eau, la présence de germes est inévitable puisqu'il s'agit d'un plan d'eau libre et accessible aux animaux.

Il existe donc un risque microbiologique (pouvant être aigu) correspondant à une pollution fécale dont il est impératif de voir s'il s'agit d'une pollution persistante ou intermittente.

Le dépassement large des normes peut correspondre à des risques inacceptables même si la présence de germes témoins laisse présager que, si une pollution fécale devait contenir des germes pathogènes, ceux-ci seraient en concentration beaucoup plus faible.

Si la pollution ne résultait que de la population locale dont l'état sanitaire est jugé satisfaisant par le responsable du poste de santé, le risque serait minime. Cependant, la population de Dindéfello est très mouvante, avec des apports importants de voyageurs venant de divers horizons dont l'état sanitaire est inconnu ce qui fait que le risque n'est plus négligeable car les porteurs de bactéries ou parasites pathogènes peuvent être nombreux.

Outre ce risque lié à ingestion directe, il y'a celui lié à la multiplication de pathogènes dans les aliments préparés avec ces eaux. En effet, l'eau du cours d'eau du fait de sa limpidité est souvent préférée à celle des forages ou des puits pour la cuisson

Lors de l'échantillonnage, les villageois ont été interrogés sur leurs techniques de désinfection. Très peu mettent de l'eau de javel à une fréquence de deux à trois fois dans le mois. Même si une javellisation était suffisante, la fréquence à la quelle elle est faite est loin d'être efficace pour éliminer les germes.

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Les formations géologiques sur lesquelles repose le village de Dindéfello appartiennent au socle constitué de terrains anciens antécambriens et primaires le plus souvent cristallins ou métamorphiques et intensément fracturés. Sur ces formations repose en discordance au Sud une importante série sédimentaire appartenant au bassin sédimentaire de Madina-Kouta. La nature de ces terrains exclut toute possibilité de nappe généralisée.

Les ressources en eau de cette zone sont localisées au niveau des zones de fracture (nappes de fracture) et dans la frange supérieure altérée qui contient la nappe phréatique. D'autres nappes sont localisées au niveau des grès fracturés qui forment le plateau et dont les émergences ont donné le cours d'eau du *FELLOWOL* lequel fait avec la nappe des altérites l'objet de cette étude.

Les mesures des paramètres physico-chimiques et leur interprétation permettent de retenir les observations suivantes :

- les eaux sont très faiblement minéralisées au niveau du cours d'eau avec des conductivités inférieures à 100 $\mu$ S/cm et faiblement à moyennement minéralisées dans la nappe où les conductivités enregistrées sont inférieures à 400 $\mu$ S/cm. Cependant, il faut noter que cette minéralisation « naturelle » est souvent fortement influencée par les activités domestiques des villageois qui utilisent le cours d'eau pour le linge, la vaisselle... Dans la nappe, la minéralisation est plus faible dans les ouvrages situés près du cours d'eau. Elle s'élève au fur et à mesure qu'on s'en éloigne vers l'intérieur du village. La comparaison avec la période d'étiage a montré qu'il y'a également des variations saisonnières assez importantes de la minéralisation.
- ce sont des eaux acides et donc agressives. Dans le cours d'eau, les pH sont très acides sur le plateau et légèrement acides à neutres en aval de la cascade. Dans la nappe on a également des pH acides (<6) et présentant une dispersion relativement homogène.
- L'étude hydrochimique montre que les faciès dominants sont les faciès bicarbonatés calciques. L'origine de la minéralisation peut être liée à plusieurs phénomènes dont le principal est la diffusion du CO<sub>2</sub> gazeux selon la formule :



Ceci à cause de l'ouverture du système sur l'atmosphère. Secondairement, elle est renforcée par la dissociation des minéraux des roches qui composent l'aquifère, notamment l'hydrolyse

des minéraux silicatés, les échanges de base avec la matrice argileuse, la minéralisation de la matière organique qui libère des  $\text{NO}_3^-$  et par les eaux de pluies enrichies en sels à cause du lessivage du couvert végétal et des sols.

L'étude piézométrique a montré que la nappe se charge probablement par deux voies : une recharge directe par les pluies et une recharge latérale (avec un sens global de l'écoulement du cours d'eau vers l'intérieur des terres) par le cours d'eau. La relation entre le cours d'eau et la nappe se traduit par une alimentation de cette dernière par le cours d'eau. Les résultats de l'étude hydrochimique ne contredisent pas ces hypothèses. L'infiltration des eaux de pluies se fait de manière très rapide du fait de la grande perméabilité secondaire. L'eau s'écoule rapidement dans les pores entraînant une rapide dispersion.

La comparaison des teneurs en éléments chimiques avec les valeurs guides de l'OMS montre que les eaux sont d'une manière générale de bonne qualité sur le plan minéralogique.

Leur état bactériologique est cependant préoccupant car il montre une pollution fécale importante avec un dépassement des normes édictées autant pour la consommation humaine que pour la baignade.

Au vue de ces constatations, des solutions doivent être recherchées pour améliorer la qualité des eaux. Ainsi des solutions tant curatives que préventives doivent être prises afin d'améliorer la qualité des eaux. Les solutions préventives consisteraient à définir et à améliorer la caractérisation de périmètres de protection des captages (ceci n'est valable bien sûr que pour les eaux souterraines). La protection à la source est presque toujours la meilleure méthode pour garantir la salubrité de l'eau et elle doit être préférée au traitement visant à rendre potable une eau contaminée. Pour le cours d'eau une prévention reste difficile à cause de son exposition aux animaux divagants et l'absence de réglementation de l'accès. Une sensibilisation des populations sur les méfaits de leurs pratiques sur la rivière serait un grand pas vers l'effort de protection.

La protection des puits pourrait être assurée par :

- la mise en place de surfaces et d'aires assainies autour d'eux pour éviter au bétail de s'en approcher ;
- la construction des abreuvoirs loin des puits traditionnels et des forages ;
- la mise en place de couvercle qui doit être vérifié régulièrement pour s'assurer qu'il est bien fixé et étanche ;
- la construction de margelles de 1,5 m environ et protection des parois du puits par cimentation pour éviter que l'eau de surface ne rentre ;

- un contrôle bactériologique régulier afin de détecter précocement les variations anormales de la qualité.

Les solutions curatives doivent consister en une désinfection des eaux. Plusieurs méthodes de désinfection simples et ne nécessitant pas l'acquisition d'un dispositif spécial pourraient suffire :

- faire bouillir vivement l'eau pendant cinq minutes pour éliminer les agents pathogènes ;
- ajouter au moins deux gouttes d'eau de javel sans parfum à usage ménager dans un litre d'eau puis laisser l'eau reposer pendant 30 minutes ;
- utiliser en suivant les directives du fabricant des comprimés de purification de l'eau qui libèrent du chlore ou de l'iode ; option particulièrement utile pour les voyageurs (les touristes).

Cependant, un jugement sur la qualité bactériologique d'une eau à utilisation sanitaire ne peut être porté une fois pour toute, à la suite d'une analyse initiale, il doit au contraire, constamment être remis en question et dépendre d'une surveillance analytique. Des mesures bimensuelles devraient donc être instaurées ce qui permettrait de suivre les variations de la qualité bactériologique.

Il faut également évaluer le risque d'une contamination cutanée (affections cutanées) et des voies respiratoires par les eaux de la vasque. Pour cela il faudrait lors des contrôles bactériologiques évaluer la présence de *Pseudomonas aeruginosa* et des staphylocoques totaux qui sont les indicateurs respectivement des affections cutanées et des voies respiratoires.

La désinfection des eaux de consommation par ébullition, par filtration lente ou par adjonction de produits chimiques appropriés n'est néanmoins jamais une solution durable même si elle peut être efficace dans l'urgence, comme c'est le cas ici. La problématique de l'eau n'est pas seulement une affaire de protection ou de restauration de la ressource, c'est également une question de gestion. La désinfection doit nécessairement être couplée à la mise en route progressive d'un programme de gestion intégrée (conciliant les différents usages) des eaux notamment :

- en considérant tout le bassin hydrogéologique comme unité de gestion dans laquelle les eaux de surface et les eaux souterraines sont inextricablement liées entre elles. Cette approche basée sur une connaissance des phénomènes naturels et anthropiques permettra de mieux comprendre les problèmes relatifs à la qualité et à la quantité d'eau, et, ainsi de déterminer les solutions d'intervention les mieux adaptées.

- en mettant en place un cadre permettant aux populations locales de se responsabiliser face à l'utilisation des ressources qui les entourent et d'acquérir des connaissances et des compétences afin de prendre en charge eux même la protection des eaux du site. Ce cadre devrait également privilégier la sensibilisation et la mise en œuvre de dispositifs permettant une utilisation rationnelle de l'eau.

Dans la perspective d'amener les villageois, à prendre l'initiative collective de protéger et conserver leur patrimoine, et de les aider à utiliser rationnellement ce patrimoine afin d'arriver au développement local auquel ils aspirent, l'adoption d'une perspective éducationnelle s'avère fondamentale. Ainsi l'éducation relative à l'environnement constitue un bon moyen d'instruire l'ensemble des citoyens en leur faisant prendre conscience du problème de l'environnement dans leur vie quotidienne et de leur inculquer les connaissances et compétences indispensables à la recherche de solutions à ces problèmes. Programme dont l'objectif général est d'éduquer les populations à avoir les comportements individuels et collectifs adéquats dans leurs relations avec leur environnement.

Les objectifs spécifiques de ce programme seront :

1. la prise de conscience de la population et autres utilisateurs sur l'importance de la préservation de leur environnement (Obs 1) ;
2. la compréhension des populations et l'ensemble des autres utilisateurs que la préservation de tout ce patrimoine passe par une préservation de la qualité des eaux du cours d'eau (Obs 2) ;
3. le développement de connaissances (surtout scientifiques) sur le site (Obs 3)
4. le renforcement de compétences des guides et gestionnaires du site (Obs 4) ;
5. la prise de conscience sur la nécessité d'une gestion participative par une analyse de la situation actuelle, des incidences des activités des différents acteurs et de la part de chaque acteur sur la conservation (Obs 5).

Ces objectifs spécifiques pourront se traduire en objectifs opérationnels :

- Obs 1 : Développer une conscience environnementale au sein de la population et les visiteurs
- Obs 2 : Conscientiser les populations et visiteurs sur la nécessité de préserver la cascade et le cours d'eau de toute pollution
- Obs 3 : Développer les connaissances sur le site
  - valoriser les connaissances traditionnelles ;
  - développer une approche pluridisciplinaire et interdisciplinaire
  - partage de connaissances

- Obs 4 : Renforcer les compétences des gestionnaires du site
- Obs 5 : Conscientiser sur la nécessité d'une gestion participative par une analyse de la situation actuelle, des incidences des activités des différents acteurs et de la part de chaque acteur sur la conservation.

Pour chacun de ces objectifs opérationnels des actions concrètes pourront être menées ; actions dont les cibles seront l'ensemble des acteurs intervenants dans le village à savoir :

- les populations locales ;
- les gestionnaires désignés et les guides touristiques
- le milieu scolaire (instituteurs et écoles de Dindéfello et des villages environnants) ;
- les hôteliers de toute la région de Tambacounda ;
- les touristes
- les autorités locales et régionales
- associations, ONGs

Le **tableau 14** résume de manière globale ce programme d'éducation à l'environnement. Les critères et indicateurs permettront d'évaluer l'efficacité des actions.

Une approche méthodologique et des outils pédagogiques sont nécessaires. Ils sont regroupés dans l'annexe 8

Obs = objectif spécifique

**Tableau 14 : Organisation du programme d'éducation relative à l'environnement**

Objectifs opérationnels	Actions à mener	Résultats attendus	Acteurs cibles	Critères	Indicateurs
Développer une conscience environnementale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organiser des forums de discussions, ateliers et séminaires sur les problématiques environnementales du site ;</li> <li>- Répertorier toutes les associations, ONGs qui interviennent dans la zone ;</li> <li>- Organiser des ateliers d'apprentissage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prise de conscience de la dépendance de la qualité de vie à celle de la qualité de l'environnement ;</li> <li>- Volonté collective affirmée de préserver la qualité de l'environnement ;</li> </ul>	TOUS LES ACTEURS	Volonté de participer aux efforts de protection de l'environnement	Nombre de personnes qui adhèrent et s'impliquent dans les activités de protection de l'environnement
Conscientiser sur la nécessité de préserver la cascade et le cours de toute pollution	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organiser des journées de réflexion sur l'eau et ces différents usages ;</li> <li>- Organiser des sorties sur le terrain et sensibiliser sur l'impact des rejets (déchets solides et détergents)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation plus rationnelle du cours d'eau ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- les femmes</li> <li>- les touristes</li> <li>- les guides touristiques</li> <li>- le milieu scolaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualité des eaux ;</li> <li>- Ramassage de déchets</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre personnes qui effectuent les activités domestiques dans la rivière ;</li> <li>- quantité de déchets par jour</li> </ul>
Développer les	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mener des études scientifiques (qualité des eaux et potentiel hydriques, études</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place d'une base de données cohérente afin de répondre aux besoins</li> </ul>	Milieu scolaire ;	Publication d'articles ou documents sur le site	Nombre de documents scientifiques sur

connaissances sur le site	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sur la faune et la flore)</li> <li>- échanger des connaissances traditionnelles et modernes ;</li> <li>- élaborer d'un système de surveillance du site</li> <li>- développer des partenariats avec des instituts scientifiques et l'université</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- d'informations scientifiques ;</li> <li>- Bonne cartographie du site</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- les partenaires (instituts scientifiques et universités) ;</li> <li>- les détenteurs de la connaissance traditionnelle.</li> </ul>		le site,
Développer les compétences des gestionnaires du site	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organiser des séminaires de formation aux différentes techniques de gestion ;</li> <li>- Séminaires et ateliers de formation des guides touristiques</li> </ul>	gestion efficace	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les gestionnaires du site ;</li> <li>- Guides touristiques</li> </ul>	Participation aux différentes formations	Nombre de personnes formées
Conscientiser sur la nécessité d'une gestion participative par une analyse de la situation actuelle, des incidences des activités des différents acteurs et de la part de chaque acteur dans la conservation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forums de discussions ;</li> <li>- Ateliers d'échanges d'informations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Engagement des différentes parties prenantes pour une gestion collective et concertée ;</li> <li>- synergie dans l'action ;</li> <li>- actions plus éclairées ;</li> <li>- coopérations entre les parties prenantes pour des prises de décisions consensuelles.</li> </ul>	TOUS LES ACTEURS	Niveau d'engagement pour les actions collectives	Nombre de personnes engagées dans les actions collectives

Dans l'immédiat, les axes prioritaires des politiques de l'eau doivent :

- assurer une eau potable de qualité et sécuritaire : en soutenant financièrement l'installation d'une unité de potabilisation de l'eau et en mettant en place des espaces publics pour les activités de lessives, vaisselles, toilettes...
- poursuivre l'assainissement de l'eau : en mettant en place des systèmes individuels ou collectifs d'épuration des eaux domestiques (eaux ménagères et vannes).

Enfin, c'est la faible productivité des ouvrages existants qui fait que les populations se retournent vers le cours d'eau. Pour remédier à cela, la réalisation de forages s'impose surtout pour le village de Dandé qui n'a pas d'autre alternative que le cours d'eau. Pour ce faire, des études géophysiques sont un préalable qui permettra de localiser les nappes productives capables de répondre de manière pérenne aux besoins de la population.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALASSANE, A. K. (2000) : Contribution à l'étude hydrochimique de l'aquifère du Continental terminal du plateau de Sékété dans le bassin côtier du Bénin, *D.E.A de Géologie Appliquée, Mention Hydrogéologie*, U.C.A.D, 88 p + annexes.

BASSOT, J. P. (1966) : Etude géologique du Sénégal oriental et de ses confins Guinéomaliens, BRGM-Dakar ; Direction des mines et de la géologie ; Min. du commerce de l'industrie et de l'artisanat ; 322 p.

BANTON, O., BANGOY, L. M. (1997) : Hydrogéologie ; multiscience environnementale des eaux souterraines. *Presses de l'université du Québec/AUPELF*, 460 p.

BESSELES, B. (1977) : Géologie de l'Afrique, Craton Ouest africain. *Mém. BRGM*, Orléans n° 88, 404 pp.

CAMUS, DEBUISSON. J. (1963) : Etude hydrogéologique des terrains anciens du Sénégal Oriental. BRGM-DAKAR ; Min de l'énergie et de l'hydraulique ; Service de l'hydraulique ; 134 p.

CHADHA, D.K (1999): A proposed new diagram for geochemical classification of naturel water and interpretation of chemical data. *Hydrogeology Journal* 7.

CEFIGRE. (1990) : L'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. Synthèse des connaissances socle cristallins et cristalloylliens et sédimentaire ancien. 2<sup>ème</sup> éd. Univ. d'Avignon, 147 p.

DEPAGNE, J ; MOUSSU, H. (1967) : Notice explicative de la carte hydrogéologique du Sénégal au 1/500.000 et de la carte hydrochimique au 1/1000.000. Min. de l'énergie et de l'hydraulique ; Direction de l'énergie et de l'hydraulique. 35 p

DEYNOUX, M., DURINGER, P., RAMZY, K., VILLENEUVE, M. (1992): Laterally and vertically accreted tidal deposits in the Upper Proterozoic Madina-Kouta Bassin, southeastern Senegal, West Africa. *Sedimentary Geology*, 84 (1993) 179-188 Elsevier Science Publishers B. v Amsterdam. 9 p.

DIOUF, O. (1996) : Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. *Thèse de doctorat* ; Univ Lyon 3 Jean Moulin ; laboratoire de géographie physique ; 438 p + annexes.

FEYBESSE, J.L et *al* (1989) : La limite Archéen-Protérozoïque d'Afrique de l'Ouest : une zone de chevauchement antérieure à l'accident de Sassandra ; l'exemple des régions d'Odienné et de Touba (Côte d'Ivoire). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 309, 1847-1853 p.

GOUDIABY, A et *al* (1992) : Etude sur la gestion des ressources naturelles au Sénégal-cas de Dindéfello-Dakar . ISE. Univ. Cheikh Anta DIOP de Dakar 38 p.

KABORE, F, (1975) : Contribution à l'étude hydrogéologique et la mise en exploitation des ressources hydrauliques de la région du centre-est de la haute-volta. *Thèse de doctorat*, Univ de Montpellier, 64 p + annexes.

LEDAUPHIN R. (2001) : Projet d'Aire du Patrimoine Communautaire sur le site de Dindéfello (sud-est du Sénégal) BTSA Gestion et Protection de la Nature/option Gestion des Espaces Naturels/promotion 2000/01.Fondation Nicolas Hulot pour la Nature et l'Homme/FRA. *Rapport*, 46 p + annexes.

MICHEL, P. (1973). Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Tomes 1 et 2, *Mémoires ORSTOM*.

OMS, (1972) : Normes internationales pour l'eau de boisson. 3<sup>ème</sup> édition OMS Genève 74 p

OMS, (2000) : Directives de qualité pour l'eau de boisson. 2<sup>ème</sup> édition, volume 2. Critères d'hygiène et documentation à l'appui, OMS, Genève.

ROY, S. (2003). Eléments d'observation et d'évaluation du programme touristique pilote de la région de Tambacounda, Sénégal oriental. Association de coopération pour le développement local des espaces naturels (Tétractys). *Rapport de stage*, 62 p + annexes.

RODIER (1996) : L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer ; 8<sup>ème</sup> éd. Dunod, Paris, 1383 p.

STANCIOFF., STALJANSSEN M., TAPPAN G : (1986) : Cartographie et télédétection des ressources de la république du Sénégal. Etude de la géologie, de l'hydrogéologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols. République du Sénégal : Ministère de l'intérieur ; Secrétariat d'Etat à la décentralisation et l'Agence des Etats Unis d'Amérique pour le développement.

TRAVY et al (1987) : Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluies au Sénégal. *Rapport*, 11 pages

WACKERMAN, J. M. (1975) : L'altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale semi-humide. Etude minéralogique et géochimique des arènes du Sénégal Oriental. Conséquences pour la cartographie et la prospection. *Thèse Sciences* Strasbourg.

PIC., (1999) : Rapport Plan d'Investissement Communale de la commune de Tambacounada (Sénégal)

#### **BIBLIOGRAPHIE RECOMMENDEE**

HASLAY, C., LECLERC, H., (1993) : Microbiologie des eaux d'alimentation. Ed. Tec&Doc-Lavoisier, 495 p

SEBEI, A., SHAABANIL, F., SOUISSI, F., SAADI, A : (2005) : Hydrologie et qualité des eaux de la nappe de Grombalia (Tunisie Nord orientale). *Science et changement planétaire/Sécheresse* Vol. 15, Numéro 2 159-66 AVRIL-MAI-JUIN.

AKHMETIEVA, N., (1992) : Pollution des eaux phréatiques par les engrais. *Hydrogéologie*, N°3, Pages 145-151

ABDELKADER, R., FETHI, B., NACER, K., LARBI, B. (2004) : Vulnérabilité et risqué de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'EL MA EL Abiod (Algérie). *Science et changements planétaires/Sécheresse* Volume 15, N°4.

Sites Web :

<http://www.baignades.sante.gouv.fr/>

<http://www.unesco.org/water/water/-links>

<http://www.who.int/watersanitationheath/bathing/recreadis.pdf>

# **ANNEXES**



*Annexe 1 : Climatologie*

Tableau 1 : Moyennes mensuelles des précipitations en mm (1970-2000)

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy ann
Kédougou	0,1	0	0,4	3,8	51,8	152,4	270,2	306,7	276,7	95,6	5,6	0,9	1164,2

Tableau 2 : Moyennes mensuelles de l'évaporation Piche en mm (1970-2000)

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy ann
Kédougou	8,3	9,6	10,2	10,3	8	4,1	2,1	1,6	1,6	2,4	4,6	6,8	5,8

Tableau 3 : Moyennes mensuelles de l'humidité relative en % (1970-2000)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy ann
Kédougou	29	27	28	34	46	67	78	81	79	72	57	39	53

Tableau 4 : Moyennes mensuelles de l'insolation en h/j (1970-2000)

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy ann
Kédougou	8,5	8,8	8,8	8,9	8,6	8	6,9	6,4	7	7,9	8,4	8,1	8,02

Tableau 5 : Moyennes mensuelles des températures en °C (1970-2000)

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy ann
Kédougou	26,2	28,7	31,1	33	32,5	29,1	26,7	26,2	26,6	27,6	27	25,5	28,3

*Annexe II.1 : Paramètres physico-chimiques des eaux du cours d'eau (août 2006)*

Points	Longitude	Latitude	pH	Temp (°C)	Cond(µS/cm)
CrS1			4,9	26,7	16,3
CrS2			4,5	28,9	22,8
CrS3			4,4	29,5	25,3
Cr1			4,7	28,8	15
CrS4			4,2	30	54,3
Cr2			4,8	28,5	17,3
Cr3			4,9	28,1	16,1
Cr4			4,6	27,8	18,4
Cr5			6,5	26,2	15,3
Cr6			6,2	26,1	18,2
Cr7			6,3	26,5	17,4
Cr8			6,4	26,1	16,6
Cr9			6	25,9	15,3
Cr10			5,7	26,3	14,5
Cr11			5,7	26,3	14,5
Cr12			5,8	26,7	14,5
Cr13			5,5	26,8	14,7
Cr14			5,7	26,9	13,4
Cr15			5,3	27,1	35,3

*Annexe II.2 : paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe (août 2006)*

Puits	Longitude	Latitude	pH	Temp (°C)	Cond(µS/cm)
P2	-12,3287778	12,3849444	6,3	30,9	202
P3	-12,3303889	12,3862222	6,1	31,6	215
P4	-12,3306167	12,3833667	6,8	31,1	118,5
P5	-12,3302833	12,3828000	5,2	31,3	59
P7	-12,3274833	12,3827333	5,5	30,2	65
P8	-12,3280667	12,3824667	5,4	30,8	81,1
P9	-12,3296000	12,3869833	5,9	32,4	143,9
P10	-12,3272833	12,3862500	4,7	31,5	122,9
P11	-12,3213833	12,3832500	5	30,5	24,9
P12	-12,3213333	12,3840333	4,7	30,9	24,3
P13	-12,3254833	12,3864333	5,7	31,4	40,8
P14	-12,3238833	12,3887500	4,3	31,8	123,4
P15	-12,3258833	12,3795500	6,4	30,5	34,4
P16			4,6	32,1	84,4
P17			5,9	31,4	139,4
P18	-12,3239500	12,3831833	7,1	31,3	399
P19	-12,3227500	12,3812500	5	30,5	29,2
P21	-12,3253611	12,3801666	5,9	30,5	90,4
P22	-12,3263888	12,3806944	5,2	31,4	75,4
P23	-12,3268888	12,3835000	5,8	31,3	168,7

Annexe II.3 : Paramètres chimiques (mg/l) des eaux du cours d'eau : août 2006

Points	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Min GLOB	TDS
CrS1	13,725	1,19	0,63	0,17	1,15	0,8	0,61	1,56	19,835	27,076342
CrS2	12,2	1,43	1,41	0,18	1,27	0,69	0,48	1,27	18,93	25,8409455
CrS3	16,775	1,3	1,39	0,15	1,23	0,62	0,48	1,17	23,115	31,5538011
CrS4	10,675	2,24	12,68	0,16	2,02	1,8	0,93	2,4	32,905	31,1826865
Cr1	13,725	1,15	1,16	0,18	1,28	0,66	0,71	1,19	20,055	27,3766593
Cr2	15,25	1,14	1,1	0,12	1,27	0,67	0,61	1,24	21,4	29,2126906
Cr3	18,3	1,25	2,5	0,15	1,43	0,94	0,62	1,63	26,82	36,6114188
Cr4	16,775	1,27	1,12	0,18	1,32	0,82	0,77	1,37	23,625	32,2499914
Cr5	19,825	1,28	1,3	0,15	1,44	0,86	0,61	1,7	27,165	37,082371
Cr6	18,3	1,29	0,96	0,19	1,49	0,91	0,66	2,18	25,98	35,4647524
Cr7	16,775	1,36	1,24	1,04	1,56	0,89	0,63	1,58	25,075	34,2293559
Cr8	18,3	1,34	1,08	0,15	1,56	0,93	0,87	1,69	25,92	35,3828477
Cr9	13,725	1,29	1,09	0,14	1,48	0,84	0,96	1,5	21,025	28,700786
Cr10	12,2	1,22	0,55	0,38	1,45	0,68	0,77	1,53	18,78	25,6361836
Cr11	13,725	1,24	0,26	0,13	1,54	0,64	0,65	1,44	19,625	26,7896754
Cr12	13,725	1,22	0,21	0,15	1,53	0,64	0,79	1,37	19,635	26,8033262
Cr13	12,2	1,21	0,18	0,15	1,57	0,66	0,81	1,39	18,17	24,8034854
Cr14	13,725	1,23	0,08	0,11	1,63	0,64	0,78	1,4	19,595	26,748723
Cr15	16,775	1,8	1,12	0,67	2,22	0,56	0,97	1,57	25,685	35,0620541

Annexe II. 4 : Paramètres chimiques (mg/l) des eaux de la nappe : août 2006

Puits	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Min GLOB	TDS
P2	120,475	3,17	6,07	0,95	6,94	2,43	4,05	30,2	174,285	134,125205
P3	129,625	3,53	4,4	1,56	5,54	1,93	6,61	28,64	181,835	139,935488
P4	59,475	2,81	7,59	2,33	5,25	2,06	3,98	12,01	95,505	90,5060773
P5	19,825	2,87	11,83	0,38	3,02	1,79	2,66	4,49	46,865	44,4119922
P7	41,175	3,33	12,08	0,42	2,95	1,85	1,27	5,56	68,635	65,0425068
P8	30,5	4,73	15,03	0,48	3,43	1,67	2,27	7,16	65,27	61,8536377
P9	85,4	2,45	4,04	1,15	4,34	1,05	3,51	19,04	120,98	114,647665
P10	18,3	7,96	38,03	1,18	5,21	4,52	4,82	7,34	87,36	82,7874029
P11	13,725	2,48	0,34	0,21	2,83	0,34	0,61	1,53	22,065	30,1204681
P12	12,2	2,45	1,35	0,18	2,46	0,53	0,73	1,38	21,28	29,0488811

P13	12,2	2,53	11,06	0,31	3,02	1,29	0,92	2,97	34,3	46,8222097
P14	12,2	7,66	40,88	1,32	5,4	9,44	1,57	5,91	84,38	79,963382
P15	24,4	1,34	1,55	0,47	3,08	0,76	1,85	3,49	36,94	50,4260183
P16	13,725	5,57	20,47	0,52	3,78	3,87	1,83	4,85	54,615	51,7563417
P17	51,85	4,76	20,7	0,33	3,84	6,53	1,12	16,42	105,55	100,025302
P18	250,1	4,32	4,15	2,13	27	2,53	9,81	21,7	321,74	230,340101
P19	16,775	2,3	0,49	0,23	3,05	0,24	3,89	2,13	29,105	39,7306243
P21	33,55	1,77	20,7	0,84	2,3	1,87	2,02	10,41	73,46	69,6149567
P22	19,825	4,56	20,82	0,19	3,75	3,15	2,62	5,01	59,925	56,7884057
P23	102,175	2,78	3,44	0,08	4,38	1,72	4,08	22,24	140,895	108,429129

*Annexe III.1: Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe (mai 2004)*

Points	Longitude	Latitude	pH	Temp (°C)	CE (µS/Cm)
P3	-12,33038889	12,38622222	6,42	29,6	141
P4	-12,33061667	12,38336667	6,03	30,2	113,3
P5	-12,33028333	12,38280000	6,11	30,4	172,2
P6	-12,32898333	12,38296667	6,86	29,9	461
P7	-12,32748333	12,38273333	5,92	29,5	82
P13	-12,32548333	12,38643333	6,02	30	27,5
F1	-12,32701667	12,38383333	6,53	30,1	333
F2	-12,32175000	12,38561111	5,8	29	50,6

*Annexe III.2 : Paramètres physico-chimiques des eaux du cours d'eau (mai 2004)*

Points	Longitude	Latitude	pH	Temp (°C)	CE (µS/Cm)
CrS1	-12,32815000	12,36293333	5,71	28	15,3
CrS2	-12,32770000	12,36320000	5,02	29,2	14,8
CrS3	-12,32733333	12,36328333	4,84	28,9	16,1
CrS4			4,4	29	51
Cr1	-12,32740000	12,36335000	4,99	29,2	14,1
Cr2	-12,32735000	12,36338333	5,7	29	16,2
Cr3	-12,32625000	12,36375000	5,7	28	20,3
Cr4	-12,32625000	12,36381667	5,53	27	19,6
Cr5			7,31	25,5	14,9
Cr6			6,9	22,7	17,1
Cr7			7,3	23	20,9
Cr8			6,68	23,7	15,1
Cr9	-12,32206667	12,35330000	7,07	25,6	10,8
Cr10	-12,32295000	12,37960000	7,11	26	12,2
Cr11	-12,32326667	12,37175000	6,78	25,9	14,3
Cr12	-12,32263333	12,37295000	6,33	26	36,9
Cr13	-12,32280000	12,37308333	6,59	26,1	21,3
Cr14	-12,32260000	12,37420000	6,89	26,5	37,8
Cr15	-12,32285000	12,37421667	5,7	28,2	14,4

Annexe III.3 : Paramètres chimiques (mg/l) des eaux du cours d'eau : mai 2004

Points	HCO3-	Cl-	NO3-	SO42-	Na+	K+	Mg2+	Ca2+	NH4+	Miné glob
CrS1	7,625	1,52	2,02		1,01	0,87	0,57	1,18	0,16	14,955
CrS2	6,1	1,42	1,8		0,92	0,42	0,43	1,01		12,1
CrS3	6,1	1,4	2,18		0,97	0,46	0,38	1,6		13,09
Cr1	6,1	1,55	1,85		1,01	0,52	0,43	1,03	0,07	12,56
Cr2	7,625	1,77	1,56	0,45	1,5	0,74	0,49	1,24	0,09	15,465
CrS4	7,625	2,52	16,95		3,02	2,07	0,89	3,46	0,08	36,615
Cr3	9,15	2,05	3,37	0,47	1,71	1,19	0,61	1,71		20,26
Cr4	9,15	1,99	2,31	0,49	1,57	0,88	0,61	1,55		18,55
Cr5	9,75	1,83	2,18	0,47	1,43	0,84	0,59	1,53		18,62
Cr6	9,15	2,13	2,84	0,5	1,74	0,99	0,66	1,51		19,52
Cr7	10,675	2,06	2,32	0,49	1,7	0,89	0,64	1,48		20,255
Cr8	7,625	2	1,93	0,5	1,67	0,87	0,62	1,32		16,535
Cr9	7,32	1,76	1,15	0,46	1,42	0,41	0,56	0,96		14,04
Cr10	7,625	1,87	1,13	0,49	1,78	0,51	0,55	0,83		14,785
Cr11	10,675	2,06	1,07	0,46	2,19	0,5	0,64	1,1		18,695
Cr12	15,25	4,33	0,93	0,47	4,86	1,32	0,57	1,27	0,56	29,56
Cr13	19,825	2,83	0,89	0,46	4,25	0,8	0,47	2,71	0,35	32,585
Cr14	12,2	6,3	3,03	0,53	6,23	1,39	0,64	1,22		31,54
Cr15	10,675	1,93		0,46	1,98	0,21	0,75	0,87		16,875

Annexe III.4 : Paramètres chimiques (mg/l) des eaux de la nappe (mai 2004)

Puits	HCO3-	Cl-	NO3-	SO42-	Na+	K+	Mg2+	Ca2+	NH4+	Miné glob
P3	106,75	2,74	2,19	1,59	4,32	1,55	3,13	25,79		148,06
P4	79,3	2,86	3,47	3,54	5,36	2,94	3,33	16,02		116,82
P5	120,475	2,08	3,57	1,91	6,39	2,95	4,64	27,31		169,325
P6	306,525	12,51	3,73	2,87	7,31	21,55	17,38	55,67		427,545
P7	44,225	3,34	15,24	0,49	2,09	1,45	2,2	13,1		82,135
P13	13,725	2,25	6,72	0,61	2,29	1,52	0,82	3		30,935
F1	297,375	2,91	2,17	2,07	6,4	1,38	8,58	82,18		403,065
F2	36,6	1,25	0,99		7,88	2,99	0,82	3,98		54,51

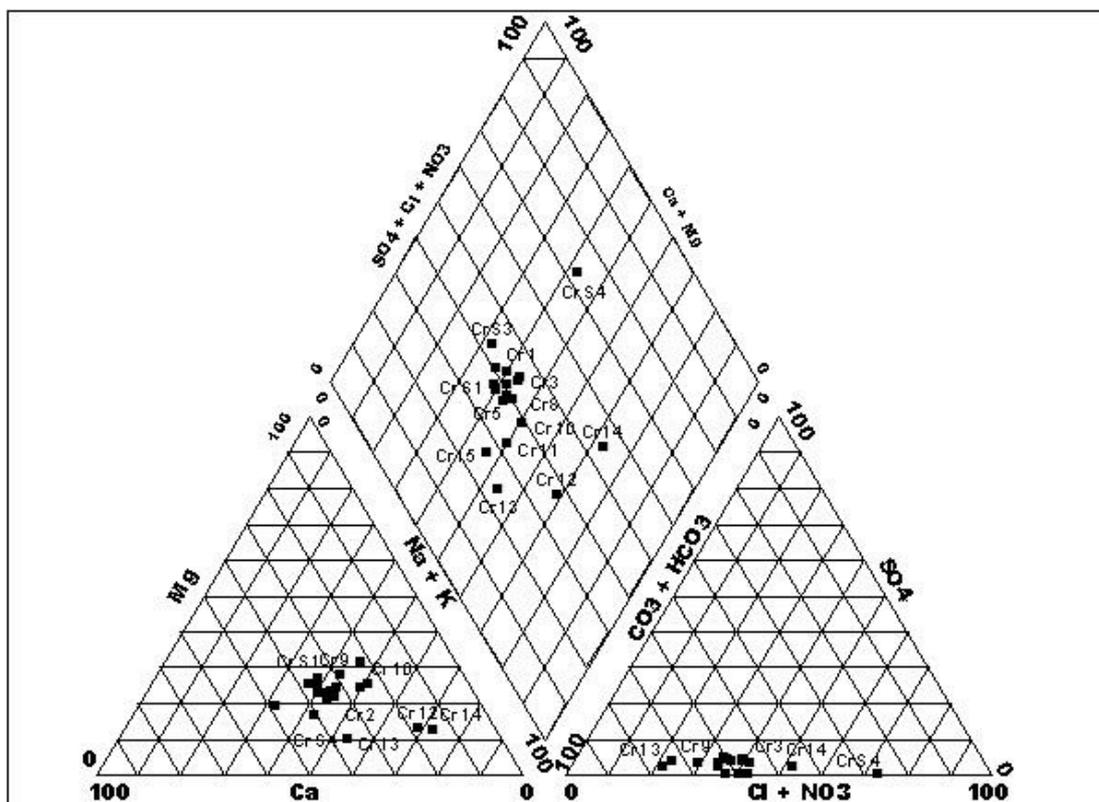
Annexe VI.1 : Rapport hydrochimiques et indices d'échanges de bases (cours d'eau)

Echantillons	Cl/NO3	Cl/SO4	Cl/NA	Cl/K	NO3/Na	NO3/Ca	Na/K	Na/Ca	K/Mg	Mg/Ca	IEB
CrS1	1,88888889	7	1,03478261	1,4875	0,54782609	0,40384615	1,4375	0,73717949	1,31147541	0,39102564	-0,63865546
CrS2	1,0141844	7,94444444	1,12598425	2,07246377	1,11023622	1,11023622	1,84057971	1	1,4375	0,37795276	-0,37062937
CrS3	0,9352518	8,66666667	1,05691057	2,09677419	1,1300813	1,18803419	1,98387097	1,05128205	1,29166667	0,41025641	-0,42307692
CrS4	0,17665615	14	1,10891089	1,24444444	6,27722772	5,28333333	1,12222222	0,84166667	1,93548387	0,3875	-0,70535714
Cr1	0,99137931	6,38888889	0,8984375	1,74242424	0,90625	0,97478992	1,93939394	1,07563025	0,92957746	0,59663866	-0,68695652
Cr2	1,03636364	9,5	0,8976378	1,70149254	0,86614173	0,88709677	1,89552239	1,02419355	1,09836066	0,49193548	-0,70175439
Cr3	0,5	8,33333333	0,87412587	1,32978723	1,74825175	1,53374233	1,5212766	0,87730061	1,51612903	0,3803681	-0,896
Cr4	1,13392857	7,05555556	0,96212121	1,54878049	0,84848485	0,81751825	1,6097561	0,96350365	1,06493506	0,5620438	-0,68503937
Cr5	0,98461538	8,53333333	0,88888889	1,48837209	0,90277778	0,76470588	1,6744186	0,84705882	1,40983607	0,35882353	-0,796875
Cr6	1,34375	6,78947368	0,86577181	1,41758242	0,6442953	0,44036697	1,63736264	0,68348624	1,37878788	0,30275229	-0,86046512
Cr7	1,09677419	1,30769231	0,87179487	1,52808989	0,79487179	0,78481013	1,75280899	0,98734177	1,41269841	0,39873418	-0,80147059
Cr8	1,24074074	8,93333333	0,85897436	1,44086022	0,69230769	0,63905325	1,67741935	0,92307692	1,06896552	0,5147929	-0,85820896
Cr9	1,18348624	9,21428571	0,87162162	1,53571429	0,73648649	0,72666667	1,76190476	0,98666667	0,875	0,64	-0,79844961
Cr10	2,21818182	3,21052632	0,84137931	1,79411765	0,37931034	0,35947712	2,13235294	0,94771242	0,88311688	0,50326797	-0,74590164
Cr11	4,76923077	9,53846154	0,80519481	1,9375	0,16883117	0,18055556	2,40625	1,06944444	0,98461538	0,45138889	-0,75806452
Cr12	5,80952381	8,13333333	0,79738562	1,90625	0,1372549	0,15328467	2,390625	1,11678832	0,81012658	0,57664234	-0,77868852
Cr13	6,72222222	8,06666667	0,77070064	1,83333333	0,11464968	0,1294964	2,37878788	1,1294964	0,81481481	0,58273381	-0,84297521
Cr14	15,375	11,1818182	0,75460123	1,921875	0,04907975	0,05714286	2,546875	1,16428571	0,82051282	0,55714286	-0,84552846
Cr15	1,60714286	2,68656716	0,81081081	3,21428571	0,5045045	0,7133758	3,96428571	1,41401274	0,57731959	0,61783439	-0,54444444

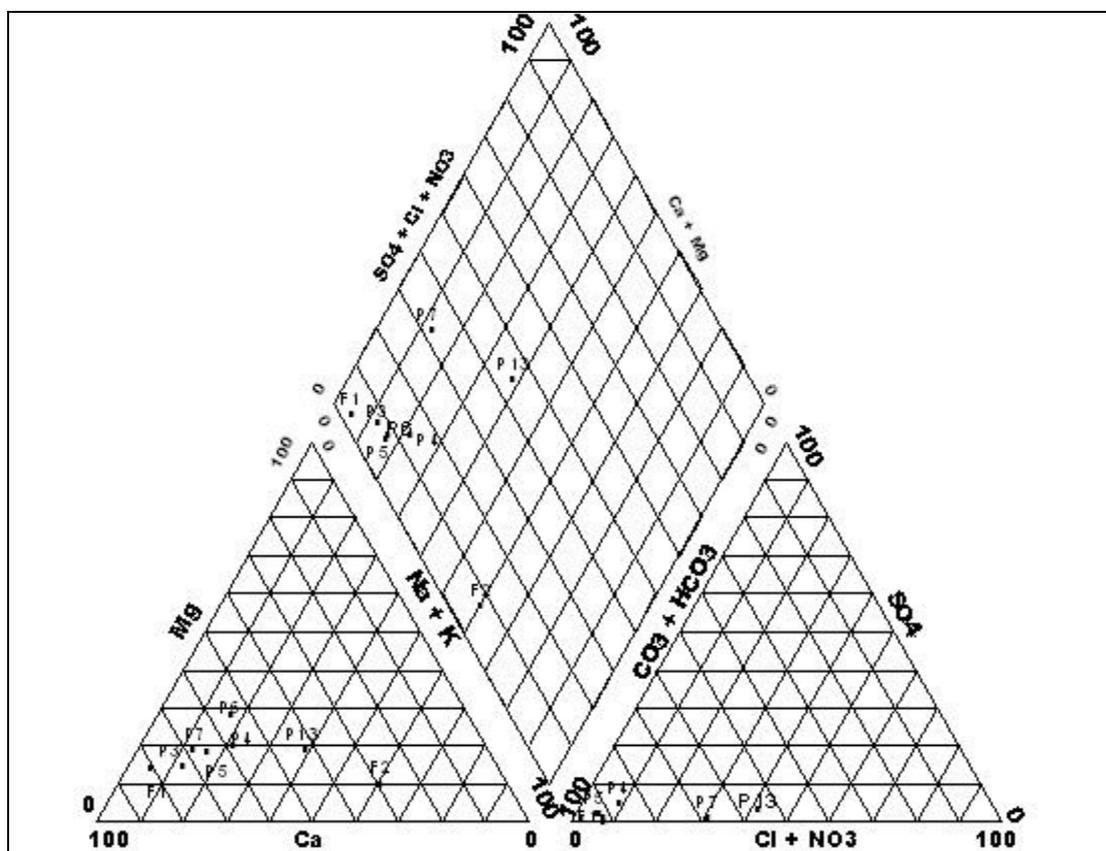
Annexe IV.2 : Rapports hydrochimiques et indices d'échanges de bases (nappe)

Echantillons	Cl/NO3	Cl/SO4	Cl/NA	Cl/K	NO3/Na	NO3/Ca	Na/K	Na/Ca	K/Mg	Mg/Ca	IEB
P2	0,52224053	3,33684211	0,45677233	1,30452675	0,87463977	0,20099338	2,85596708	0,22980132	0,6	0,13410596	-1,95583596
P3	0,80227273	2,26282051	0,63718412	1,82901554	0,79422383	0,15363128	2,87046632	0,19343575	0,29198185	0,23079609	-1,11614731
P4	0,37022398	1,20600858	0,5352381	1,36407767	1,44571429	0,63197336	2,54854369	0,43713572	0,51758794	0,33139051	-1,60142349
P5	0,24260355	7,55263158	0,95033113	1,60335196	3,91721854	2,63474388	1,68715084	0,67260579	0,67293233	0,59242762	-0,67595819
P7	0,27566225	7,92857143	1,12881356	1,8	4,09491525	2,17266187	1,59459459	0,53057554	1,45669291	0,22841727	-0,44144144
P8	0,31470393	9,85416667	1,37900875	2,83233533	4,3819242	2,09916201	2,05389222	0,47905028	0,73568282	0,31703911	-0,0782241
P9	0,60643564	2,13043478	0,56451613	2,33333333	0,93087558	0,21218487	4,13333333	0,22794118	0,2991453	0,18434874	-1,2
P10	0,20930844	6,74576271	1,52783109	1,76106195	7,29942418	5,18119891	1,15265487	0,70980926	0,93775934	0,65667575	-0,22236181
P11	7,29411765	11,8095238	0,87632509	7,29411765	0,12014134	0,22222222	8,32352941	1,8496732	0,55737705	0,39869281	-0,27822581
P12	1,81481481	13,61111111	0,99593496	4,62264151	0,54878049	0,97826087	4,64150943	1,7826087	0,7260274	0,52898551	-0,22040816
P13	0,22875226	8,16129032	0,83774834	1,96124031	3,66225166	3,72390572	2,34108527	1,01683502	1,40217391	0,30976431	-0,70355731
P14	0,18737769	5,8030303	1,41851852	0,81144068	7,57037037	6,91708968	0,5720339	0,91370558	6,01273885	0,26565144	-0,93733681
P15	0,86451613	2,85106383	0,43506494	1,76315789	0,50324675	0,44412607	4,05263158	0,88252149	0,41081081	0,53008596	-1,86567164
P16	0,27210552	10,7115385	1,47354497	1,43927649	5,41534392	4,22061856	0,97674419	0,77938144	2,1147541	0,37731959	-0,37342908
P17	0,22995169	14,4242424	1,23958333	0,72894334	5,390625	1,26065773	0,58805513	0,23386114	5,83035714	0,0682095	-1,17857143
P18	1,04096386	2,02816901	0,16	1,70750988	0,1537037	0,19124424	10,6719368	1,24423963	0,2579001	0,45207373	-5,83564815
P19	4,69387755	10	0,75409836	9,58333333	0,16065574	0,23004695	12,7083333	1,43192488	0,06169666	1,82629108	-0,43043478
P21	0,08550725	2,10714286	0,76956522	0,94652406	9	1,98847262	1,22994652	0,2209414	0,92574257	0,19404419	-1,3559322
P22	0,21902017	24	1,216	1,44761905	5,552	4,15568862	1,19047619	0,74850299	1,20229008	0,52295409	-0,51315789
P23	0,80813953	34,75	0,6347032	1,61627907	0,78538813	0,15467626	2,54651163	0,19694245	0,42156863	0,18345324	-1,1942446

ANNEXE.V (a) faciès géochimiques des eaux du cours d'eau en saison sèche (mai 2004)



ANNEXE V (b) faciès géochimiques des eaux de la nappe en saison sèche (mai 2004)



*Annexe VI.1 : Matrice de corrélation des eaux du cours d'eau*

	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	0,04	0,08	0,02	0,00	0,01	0,04	0,00
Cl <sup>-</sup>		1	0,71	0,04	0,58	0,50	0,20	0,41
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			1	0,00	0,19	0,84	0,07	0,45
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>				1	0,13	0,00	0,00	0,00
Na <sup>+</sup>					1	0,12	0,51	0,26
K <sup>+</sup>						1	0,08	0,66
Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>							1	0,12
Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>								1

*Annexe VI.2 : Matrice de corrélation des eaux de la nappe*

	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	0,00	0,11	0,34	0,72	0,00	0,72	0,64
Cl <sup>-</sup>		1	0,70	0,05	0,03	0,66	0,01	0,00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			1	0,01	0,01	0,69	0,27	0,04
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>				1	0,36	0,05	0,45	0,22
Na <sup>+</sup>					1	0,01	0,64	0,18
K <sup>+</sup>						1	0,00	0,00
Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>							1	0,41
Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>								1

*Annexe VII : variations de la profondeur de la nappe en fonction des saisons*

Puits	Saisons sèches		Saisons des pluies		
	Mai 2003	Mai 2004	Août 2003	Août 2004	Août 2006
P1	sec	sec	5,35	6,69	nm
P2	7,65	nm	5,12	nm	5,97
P3	7,2	6,84	4,31	6,18	6,14
P4	sec	11,14	1,97	6,18	10,9
P5	sec	10	2,49	5,47	6,12
P6	sec	10,45	4,30	nm	nm
P7	sec	9,52	4,96	7,19	4,54
P8	sec	sec	5,16	5,98	9,4
P9	sec	sec	1,5	nm	5,84
P10	sec	sec	2,96	4,78	4,81
P11	sec	sec	1,38	1,38	1,42
P12	sec	sec	4,48	4,34	4,51
P13	sec	8,2	0,89	7,89	9,99
P14	sec	sec	2,56	5,15	5,3
P15	nr	nr	nr	6	12,33
P16	nr	nr	nr	nr	4,45
P17	nr	nr	nr	nr	5,08
P18	nr	nr	nr	nr	9,1
P19	nr	nr	nr	nr	2,61
P20	nr	nr	nr	nr	nm
P21	nr	nr	nr	nr	11,42
P22	nr	nr	nr	nr	5,43
P23	nr	nr	nr	nr	4,81

nm : non mesuré

nr : non réalisé

*Annexe VIII : Approches méthodologiques du programme d'éducation relative à l'environnement*

<b>Objectifs opérationnels</b>	<b>Actions à mener</b>	<b>Acteurs cibles</b>	<b>Approches/Méthodologies</b>	<b>Outils/techniques</b>
Développer une conscience environnementale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organiser des forums de discussions, ateliers et séminaires sur les problématiques environnementales du site ;</li> <li>- Répertorier tous les associations, ONGs qui interviennent dans la zone ;</li> <li>- Organiser des ateliers d'apprentissage</li> </ul>	TOUS LES ACTEURS	<p>Méth. morales (analyse et clarification de valeurs sous-jacentes)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Approche comportementaliste</b></li> <li>- <b>Approche émotionnelle ou affectives (renforcement de l'appartenance au milieu, développer une sensibilité environnementale)</b></li> <li>- <b>Approche participative</b></li> </ul> <p>-Discursives (Forums et discussions) -Expressives (expression artistique, actions de communication)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jeux de rôle ;</li> <li>- jeux ;</li> <li>- sorties éducatives ;</li> <li>- dessins ;</li> <li>- théâtres populaires.</li> </ul>
Conscientiser sur la nécessité de préserver la cascade et le cours de toute pollution	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organiser des journées de réflexion sur l'eau et ces différents usages ;</li> <li>- Organiser des sorties sur le terrain et sensibiliser sur l'impact des rejets (déchets solides et détergents)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- les femmes</li> <li>- les touristes</li> <li>- les guides touristiques</li> <li>- le milieu scolaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Approche cognitive</b></li> <li>- <b>Approche comportementaliste</b></li> </ul> <p>-Méthodes expositives (leçons, exposés)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Approche participative</b></li> </ul> <p>-Discursives (Forums et discussions) -Expressives (expression artistique, actions de communication)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sorties éducatives ;</li> <li>- dessins ;</li> <li>- posters ;</li> <li>- rapports d'études ;</li> <li>- affiches</li> </ul>
Développer les connaissances sur le site	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mener des études scientifiques (qualité des eaux et potentiel hydrique, études sur la faune et la flore)</li> <li>- échanger des connaissances traditionnelles et modernes ;</li> <li>- élaborer d'un système de surveillance du site</li> <li>- développer des partenariats avec des</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Milieu scolaire ;</li> <li>- les partenaires (instituts scientifiques et universités) ;</li> <li>- les détenteurs de la connaissance traditionnelle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Approche cognitive</b></li> </ul> <p>-Méthodes scientifiques -Méthodes pratiques</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Approche participative</b></li> </ul> <p>-Expressives (forum et discussions)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cartes ;</li> <li>- rapports d'études ;</li> <li>- cours.</li> </ul>

	instituts scientifiques et l'université			
Développer les compétences des gestionnaires du site	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organiser des séminaires de formation aux différentes techniques de gestion ;</li> <li>- Séminaires et ateliers de formation des guides touristiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les gestionnaires du site ;</li> <li>- Guides touristiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Approche cognitive</b></li> <li>- Méthodes scientifiques</li> <li>- Méthodes pratiques</li> <li>- <b>Approche participative</b></li> <li>- Expressives (forum et discussions)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cours ;</li> <li>- brainstorming ;</li> <li>- études sur le terrain</li> </ul>
Conscientiser sur la nécessité d'une gestion participative par une analyse de la situation actuelle, des incidences des activités des différents acteurs et de la part de chaque acteur dans la conservation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forums de discussions ;</li> <li>- Ateliers d'échanges d'informations</li> </ul>	TOUS LES ACTEURS	<p>Méth. morales (analyse et clarification de valeurs sous-jacentes)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Approche comportementaliste</b></li> <li>- <b>Approche émotionnelle ou affectives (renforcement de l'appartenance au milieu, développer une sensibilité environnementale)</b></li> <li>- <b>Approche participative</b></li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Discursives (Forums et discussions)</li> <li>- Expressives (expression artistique, actions de communication)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jeux de rôle ;</li> <li>- jeux ;</li> <li>- sorties éducatives ;</li> <li>- dessins ;</li> <li>- théâtres populaires.</li> </ul>