Hydrogéologie d'aquifères complexes en zone semi-aride : les aquifères quaternaires du Grand Yaéré (Nord Cameroun)

Benjamin Ngounou Ngatcha

▶ **To cite this version:**

Benjamin Ngounou Ngatcha. Hydrogéologie d'aquifères complexes en zone semi-aride : les aquifères quaternaires du Grand Yaéré (Nord Cameroun). Géologie appliquée. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1993. Français. NNT : . tel-00783502

HAL Id: tel-00783502

https://theses.hal.science/tel-00783502

Submitted on 1 Feb 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

GEOLOGIE GRENOBLE UJF
D 050 030959 2

NGOUNOU NGATCHA (B)

THESE

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
15, RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TÉL. (33) 76 63 59 66
FAX. (33) 76 87 82 43

29 MARS 1993

présentée par

NGOUNOU NGATCHA Benjamin

Pour obtenir le titre de DOCTEUR de

l'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I
(Arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 23 novembre 1988)

Spécialité : Sciences de la Terre
Mention : Géologie Appliquée

Hydrogéologie d'aquifères complexes en zone semi-aride
Les aquifères quaternaires du Grand Yaéré (Nord Cameroun)

Date de soutenance : 25 mars 1993

Composition du jury :

M. R. BARBIER	Professeur Emérite - Université Joseph Fourier - Grenoble I	Président
M. J. SARROT-REYNAULD	Professeur - Université Joseph Fourier - Grenoble I	Directeur de Thèse
M. J. MUDRY	Maître de conférences - Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse	Rapporteurs
M. J.F. ARANYOSSY	D.H.D.R., Ingénieur de Recherches A.N.D.R.A. - Paris	
M. A. MOREL	Professeur - Université Joseph Fourier - Grenoble I	Examinateurs
M. G.E. EKODECK	Directeur - I.R.G.M. (Cameroun)	
M. J.C. FOURNAUX	Maître de conférences - Université Joseph Fourier - Grenoble I	

Thèse préparée au sein de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (I.R.G.M. - Cameroun) et du Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu (U.J.F. - Grenoble I)

THESE de DOCTORAT
de l'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

Titre de l'ouvrage :

HYDROGEOLOGIE D'AQUIFERES COMPLEXES EN ZONE SEMI-ARIDE LES AQUIFERES QUATERNAIRES DU GRAND YAERE (NORD CAMEROUN)

Nom de l'auteur :

NGOUNOU NGATCHA Benjamin

Etablissement :

Laboratoire d'hydrogéologie
Institut Dolomieu

RESUME

Les aquifères quaternaires du Grand Yaéré ont fait l'objet de nouvelles investigations hydrogéologiques dont les résultats portent sur leurs redéfinitions et leurs fonctionnements.

L'identification géologique et hydrogéologique du milieu a révélé l'existence d'un aquifère de type monocouche dans le piémont et de type bicouche dans les Yaérés.

L'alimentation des aquifères du piémont à partir des précipitations et des eaux de surface est mise en évidence par l'étude piézométrique et confirmée respectivement par la composition isotopique et la chimie des eaux souterraines.

A l'exception des nappes perchées, la relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines dans les Yaérés montre que la recharge des nappes ne se fait pas par infiltration directe des précipitations. L'étude piézométrique complétée par la chimie et les isotopes suggère que l'infiltration dans les niveaux aquifères superficiels s'effectue dans les zones de stagnation des eaux de surface. Les teneurs en isotopes lourds des eaux profondes quant à elles témoignent une alimentation à partir des eaux du système aquifère du piémont et du cordon sableux.

Le cordon sableux Limani-Yagoua jadis considéré comme stérile, joue donc le rôle de régulateur dans la reconstitution des niveaux d'eau des nappes sous-jacentes.

Les études géologique et géochimique permettent clairement de mettre en cause l'existence d'anomalies piézométriques ou "nappes en creux", attribuées à l'effet d'évaporation, dans les Yaérés.

Sur la base des données hydrodynamiques et hydroclimatiques, l'ordre de grandeur des ressources et des réserves en eaux souterraines de la région a été défini.

L'exploitation des eaux souterraines est surtout pratiquée à partir des nappes alluviales superficielles. Les aquifères profonds constituent une solution envisageable dans des secteurs à nappes superficielles inextistantes ou peu importantes.

A la suite d'un bilan des connaissances sur les risques de pollution des eaux souterraines, un plan de prévention et de protection des nappes est proposé.

MOTS CLES

"Grand Yaéré" ; Aquifères quaternaires ; Monocouche (piémont) ; Bicouches (Yaérés) ; Cordon sableux ; Anomalies piézométriques ; Ressources et réserves en eaux ; Exploitation et pollution.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
15, RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TÉL. (33) 76 63 59 66
FAX. (33) 76 87 82 43

THESE

présentée par

NGOUNOU NGATCHA Benjamin

29 MARS 1993

Pour obtenir le titre de DOCTEUR de

l'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I
(Arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 23 novembre 1988)

Spécialité : Sciences de la Terre
Mention : Géologie Appliquée

Hydrogéologie d'aquifères complexes en zone semi-aride
Les aquifères quaternaires du Grand Yaéré (Nord Cameroun)

Date de soutenance : 25 mars 1993

Composition du jury :

M. R.	BARBIER	Professeur Emérite - Université Joseph Fourier - Grenoble I	Président
M. J.	SARROT-REYNAULD	Professeur - Université Joseph Fourier - Grenoble I	Directeur de Thèse
M. J.	MUDRY	Maître de conférences - Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse	Rapporteurs
M. J.F.	ARANYOSSY	D.H.D.R., Ingénieur de Recherches A.N.D.R.A. - Paris	
M. A.	MOREL	Professeur - Université Joseph Fourier - Grenoble I	Examinateurs
M. G.E.	EKODECK	Directeur - I.R.G.M. (Cameroun)	
M. J.C.	FOURNAUX	Maître de conférences - Université Joseph Fourier - Grenoble I	

Thèse préparée au sein de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (I.R.G.M. - Cameroun) et du Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu (U.J.F. - Grenoble I)

10071837

"Au commencement, Dieu créa les cieux et la terre. La terre était informe et vide; il y avait des ténèbres à la surface de l'abîme, et l'esprit de Dieu se mouvait au dessus des eaux."

Genèse. Chapitre 1, verset 1 à 2. La BIBLE.

"Parmi les eaux de notre environnement et celles que nous utilisons, une espèce est encore souvent très méconnue : l'eau souterraine, la moins visible et pourtant présente sous nos pieds presque partout; la plus vouée aussi à l'imagination et pourtant la plus stable dans la réalité."

J. BODELLE & J. MARGAT. L'eau souterraine en France.

Avant-propos.

Après quatre années consacrées aux problèmes de l'eau dans le Nord Cameroun, il est difficile de synthétiser entièrement l'apport de plusieurs heures de discussions animées autour d'un thème de recherche qui nécessite la confrontation de spécialistes de divers horizons : Chercheurs, Universitaires, Exploitants, Elus, Juristes, Industriels, Agriculteurs, Eleveurs, Paysans, Aménageurs, Agronomes...

A plusieurs tournants décisifs de ce travail, j'ai été confronté à d'énormes difficultés qui nécessitent très souvent beaucoup de courage et d'initiative. Je suis heureux qu'il soit aujourd'hui à son terme. Au moment où je le présente, j'ai en effet le devoir impérieux et combien honorable de remercier directement ou indirectement tous ceux qui ont participé à sa réalisation.

Je tiens en première ligne à remercier tous les organismes et Instituts qui au travers de l'I.R.G.M ont aidé ou collaboré à la préparation de ce mémoire. Il s'agit notamment :

- de l'**Agence Internationale de l'Energie Atomique** (A.I.E.A.) dans le cadre des activités du "Projet CMR/8/002 - 1989 à 1990" puis du projet régional RAF/8/012. L'AIEA m'a accordé une bourse de stage au Laboratoire d'Hydrologie et Géochimie Isotopique de l'Université Paris XI de mai à juillet 1990. Je n'oublierais pas de remercier Monsieur le Professeur **Jean Charles FONTES** qui au nom de l'AIEA m'a accueilli dans son Laboratoire lors de mon premier séjour en France;

- du **Centre de Recherches pour le Développement International** (C.R.D.I.) dans le cadre du projet "Grand Yaéré - Cameroun, avril 1991 à mars 1994". Au sein de ce projet, j'ai bénéficié d'un stage (Février à mai 1992) d'initiation à la géostatistique et à la modélisation numérique à l'Institut des Sciences de la Terre de Dakar et d'un accord de financement de mes inscriptions à l'Université de Dakar durant la période 1991/1993. Au Bureau CRDI de Dakar, mes remerciements vont à l'endroit de Monsieur **Serge DUBE** et de Madame **Cathérine DAFFEE** qui m'ont beaucoup encouragé dans ce travail;

- du **Centre O.R.S.T.O.M** de Yaoundé. Je remercie Messieurs **Philippe MATHIEU** ancien Représentant de l'ORSTOM au Cameroun, actuellement Représentant du même Institut au Sénégal et **Jean Claude OLIVRY** Représentant de l'ORSTOM au Mali pour les démarches qu'ils ont entrepris auprès de l'ORSTOM Paris en ma faveur. Je suis désolé que les difficultés soulevées dans mon administration d'attache n'ait pas permis de décrocher la bourse qu'ils visaient pour moi.

Au cours de ma formation en Sciences et Techniques de l'Ingénieur à l'Université nationale de Côte d'Ivoire, j'ai eu la chance de rencontrer un homme aimable et désintéressé, Monsieur le **Professeur Jean SARROT-REYNAULD**. Après avoir facilité mon inscription en thèse à Grenoble, et malgré mes 24

mois d'absence dans cette ville, il a guidé ce travail avec patience aussi bien pendant mon séjour au Cameroun qu'à Grenoble. Il m'a également apporté tout le soutien moral et matériel. On ne peut être mieux guidé et pour lui redire ma joie et ma reconnaissance, je ne saurais mieux faire que de me servir de cette pensée de François FORD COPPOLA, dans "Réalisateur" je cite :" Pour reussir, il faut obtenir la sentence et les conseils d'un ancien, d'un homme expérimenté, respecté, qui vous guide, qui dit partout qu'il est votre ami".

Je remercie Monsieur le **Professeur Reynold BARBIER**, membre de l'academie des sciences, qui me fait l'honneur de présider le jury.

J'exprime également mes remerciements à Monsieur le **Professeur Alain MOREL** de l'Institut de Géographie Alpine de l'Université Joseph Fourier, qui a accepté de juger ce travail.

Mon séjour à Dakar (Sénégal) m'a permis de rencontrer Monsieur **Jean François ARANYOSSY**, alors Expert de l'A.I.E.A pour l'Afrique de l'Ouest et Centrale, un homme très attaché aux activités universitaires. C'est à lui que je dois d'avoir entrepris cette thèse dans le cadre du "Projet CMR/8/002". Il m'a personnellement initié sur le terrain aux méthodes d'échantillonnage d'eaux en vue des analyses isotopiques. Ses critiques ont très souvent donné une impulsion à ma méthode de travail. Pendant les moments d'hésitation, j'ai bénéficié de ses conseils très fructueux qui ont été pour moi les raisons d'une profonde motivation. Je lui renouvelle ici toute ma reconnaissance pour la confiance qu'il m'a accordé et je suis très heureux de le voir siéger à mon jury comme rapporteur d'autant plus qu'il s'agit d'une région qu'il connaît très bien pour y avoir séjourné plusieurs fois entre 1987 et 1991.

Je remercie vivement Monsieur **Georges Emmanuel EKODECK**, Directeur de l'IRGM qui a bien voulu me faire profiter de son expérience et de sa connaissance de la région. Mon goût pour les sciences appliquées m'a permis de le cotoyer en 1986 alors qu'il me dispensait les enseignements de géologie appliquée en Licence de géologie de l'Université de Yaoundé. Je reste très sensible à l'intérêt soutenu qu'il a toujours porté depuis bientôt 6 ans à mes travaux et surtout à mes problèmes qui dépassaient très souvent le cadre de cette thèse. Je me réjouis de l'honneur qu'il me fait en participant à mon jury, représentant ainsi l'Institut de Recherches Géologiques et Minières qui m'a préparé à la vie professionnelle.

Monsieur **Jacques Noël MUDRY** a assuré une bonne partie de ma formation d'hydrogéologue, alors qu'il était responsable du 3e cycle au sein du Département de Géologie de l'Université Cheihk Anta Diop de Dakar (Sénégal). Il a été en 1990 le témoin de mes premiers pas de chercheur. Depuis bientôt 5 ans que j'ai fait sa connaissance, il m'a toujours prodigué des encouragements amicaux. Qu'il sache combien je me sens honoré de sa présence dans mon jury comme rapporteur.

Je remercie Monsieur **Jean Claude FOURNEAUX** pour sa participation au jury, ses encouragements et son soutien matériel.

Plusieurs Universités et Instituts ont contribué à ma formation. J'ai en mémoire de nombreux enseignants et amis qui m'ont facilité la tache et que je tiens ici à remercier :

- au Cameroun, je pense à tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé, devenue aujourd'hui Université de Yaoundé I et de Yaoundé II, qui ont assuré ma formation de base de géologue. Mes remerciements vont plus particulièrement à Monsieur le **Professeur Félix TCHOUA** qui a spontanément pris part à mes difficultés et a constamment mis à ma disposition son équipement de terrain lors de mes déplacements dans le Grand Yaéré. Mes amitiés à **César MBANE** du Département de physique, **Daniel LAMILEN** et **Henri Bosco DJEUDA TCHAPNGA** du Département des Sciences de la Terre et **Jean Claude TCHOUANKOUE** du Département de chimie organique;

- en Côte d'Ivoire, Messieurs **Jean BIEMI** et **Jean Patrice JOURDA** du Département des sciences de la terre avec qui j'ai passé quelques semaines d'hiver 1992 en France m'ont témoigné de leurs encouragements;

- au Sénégal, Monsieur **Babacar NDIAYE** (alors Assistant à l'Institut des Sciences de la Terre à Dakar et actuellement dans la Société des Phosphates de Taïba dans le même pays) m'a initié à la géostatistique et à la modélisation numérique dans le cadre du "Projet Grand Yaéré - Cameroun". Monsieur **Abdoulaye FAYE** a facilité mon accès aux équipements informatiques du Département de Géologie;

- en France, Les responsables de l'**Institut de Géographie Alpine** et de l'**Institut Dolomieu** ont largement contribué à la réalisation de ce mémoire, au travers du soutien administratif qu'ils m'ont apporté. Monsieur **Jean DAZY**, Maître de conférences à l'Institut Dolomieu m'a fait bénéficié de ses critiques et de ses suggestions.

Les travaux de terrains et de collecte des données qui ont servi à l'élaboration de ce travail ce sont déroulés au sein du Centre de Recherches Hydrologiques (C.R.H.) de l'I.R.G.M. Je remercie à ce titre Monsieur **Emmanuel NAAH**, Chef du CRH, Responsable des projets "CMR/8/002" et "Grand Yaéré - Cameroun" qui m'a fait découvrir le Grand Yaéré et m'a permis de profiter de l'appui technique de toute son équipe. Je suis désolé de ne pouvoir l'associer à mon jury de thèse. Bien que ce travail ne permette pas pour l'instant d'atteindre tous les objectifs du projet "Grand Yaéré - Cameroun" en raison de la précarité des informations nécessaires à certains sujets de grande portée comme la modélisation hydrogéologique, je crois réellement, à partir des conclusions auxquelles je suis parvenu, qu'un "Grand Yaéré" peut en cacher un autre et que ce projet ne vient que de commencer.

Je remercie les **Chercheurs**, les **Techniciens** et le **personnel administratif** de **l'IRGM** qui par leurs simples présences ou leurs aides de tous les jours ont su maintenir un climat propice à la réalisation de mes travaux. Malheureusement, ils sont très peu nombreux à avoir agi spontanément.

j'exprime toute ma gratitude à la famille **MAFEU NGAMI** à Bangoulap; à Messieurs **Chrétien FOGUE** à Yaoundé, **Arron KAMGA** (et Madame) à Paris, **Samuel KWAMO** (et Madame) à Bangangté, **David KWENDA** à Douala, **NKENDO Pierre** (et Madame) à Douala, **Gabriel TCHATAT** (et Madame) à Abidjan, **Pierre TCHOUMI** à Douala, **Raphaël TOGHOUA** (et Madame) à Douala; à Mesdames **Véronique TCHOUANKEU** à Yaoundé, **Alice YANKAM** à Douala, pour leur sympathie, leur soutien et leur amitié constante à ma personne. Je souhaite que cet exemple germe très rapidement dans l'esprit de leurs enfants.

Je remercie vivement mon ami et frère **Philippe NDJANKEU** qui a su me soutenir dans les moments difficiles et m'a constamment aidé à mener à bien cette thèse. Philippe je te renouvelle ma gratitude pour toute la confiance que tu me fais. Autant de confiance, autant de responsabilité de ma part.

Que Messieurs **Roger KAMTCHOUM** (et Madame) à Maroua, **Lucas KENGNI** en France, **Jean Claude KEPMENI** (et Madame) à Bokito, **Joseph KOUMI** à Douala, **Richard NANA** à Yaoundé, **Raphaël NAMY** à Douala, **Richard NGANTEU** à Bertoua, **Jean Pierre NGEUTNKAM** à Yaoundé, **Roger NJITCHOUA** en France, **Pascal Ruben NKETCHA** à Douala, **Frédéric NOUA** (et Madame) en Côte d'Ivoire, **David NOUNDJI** à Yaoundé, **Roger NSONTANG** à Yaoundé, **Emmanuel NYA** à Douala, **François NZOUANTCHEP** (et Madame) à Yaoundé, **Jean Yves SIWAH SIMEN** au Bénin, **Romuald TAMPE** à Douala, **Marcel TONGA** à Yaoundé, **Grégoire WANDJI** à Yaoundé, **Dieudonné YOUMEN** (et Madame) en Allemagne, trouvent ici l'expréssion de mes plus sincères et chaleureux remerciements et qu'ils sachent combien j'apprécie leurs amitiés et le cadre fraternel dans lequel nous collaborons.

Monsieur **Elie NGABU**, enseignant à l'Ecole Nationale Supérieure des Postes et Télécommunications (ENSPT - Yaoundé) m'a aidé en me réservant un cadre familial propice à l'exécution de ce travail. Je l'en remercie.

Mon collègue **Jean Michel NJINKOUE** et mon petit frère **Roger TIEYAK** m'ont toujours accueilli avec joie durant mes cours séjours à Dakar. Je les remercie bien vivement pour leurs amabilités.

Je n'aurai garde d'oublier Mademoiselle **Nicole Pélagie NYANDJOU TCHOUANKEU** qui m'a beaucoup encouragé tout au long de ce travail et a su maintenir le moral de l'auteur à 6000 km du Grand Yaéré. Je suis heureux de la remercier très affectueusement pour la grande part qu'elle a prise à la réalisation de cette thèse.

J'ai toujours trouvé les encouragements les plus efficaces auprès de ma tante **Tabia FEUTJET**, de ma soeur **Pauline NGATCHA** et de mon frère **Joseph YANKAM**. Je leurs rends un hommage particulier pour les efforts qu'ils ont consenti à ma formation.

Je **dédie** cette thèse à :

- **Bangoulap** la terre de mes ancêtres;
- ma mère **Rose TCHANDJEU** a qui je suis le plus redevable;
- mes frères et soeurs **Alice NGNAMBA, Jeannot NKOUENGOUA, Angeline NGOUMGNIA, Raymond YANKAM, Marc NOUMI NGATCHA, Elise FEUTMI** et **Yvonne NDJAKOU**. A toutes les circonstances de son élaboration, vous m'avez prêté une oreille attentive. A travers cette thèse, je vous traduis mon profond amour et toute ma disponibilité.
- la mémoire de mon père, Feu **Marc NGATCHA**, qui jusqu'à ces dernières heures du 2 avril 1988, m'a toujours encouragé à atteindre le niveau le plus élevé dans mon domaine d'étude. Papa, le succès de ce mémoire est dû en grande partie à ton soutien qui ne m'a jamais manqué. Tu m'as toujours préché les vertues de la vérité et de la rigueur. Aussi loin que je m'en souvienne, tu continues à appuyer ton méssage. Papa, reposes en paix car, Dieu ne cesse d'exhausser tes prières.

"Tazuî de Magnie"

HYDROGEOLOGIE D'AQUIFERES COMPLEXES EN ZONE SEMI-ARIDE. LES AQUIFERES QUATERNAIRES DU GRAND YAERE (NORD CAMEROUN).

Résumé.

Les aquifères quaternaires du Grand Yaéré ont fait l'objet de nouvelles investigations hydrogéologiques dont les résultats portent sur leurs redéfinitions et leurs fonctionnements.

L'identification géologique et hydrogéologique du milieu a révélé l'existence d'un aquifère de type monocouche dans le piémont et de type bicouche dans les Yaérés.

L'alimentation des aquifères du piémont à partir des précipitations et des eaux de surface est mise en évidence par l'étude piézométrique et confirmée respectivement par la composition isotopique et la chimie des eaux souterraines.

A l'exception des nappes perchées, la relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines dans les Yaérés montre que la recharge des nappes ne se fait pas par infiltration directe des précipitations. L'étude piézométrique complétée par la chimie et les isotopes suggère que l'infiltration dans les niveaux aquifères superficiels s'éffectue dans les zones de stagnation des eaux de surface. Les teneurs en isotopes lourds des eaux profondes quant à elles témoignent une alimentation à partir des eaux du système aquifère du piémont et du cordon sableux.

Le cordon sableux Limani-Yagoua jadis considéré comme stérile, joue donc le rôle de régulateur dans la reconstitution des niveaux d'eau des nappes sous-jacentes.

Les études géologique et géochimique permettent clairement de mettre en cause l'existence d'anomalies piézométriques ou "nappes en creux", attribuées à l'effet d'évaporation, dans les Yaérés.

Sur la base des données hydrodynamiques et hydroclimatiques, l'ordre de grandeur des ressources et des réserves en eaux souterraines de la région a été défini.

L'exploitation des eaux souterraines est surtout pratiquée à partir des nappes alluviales superficielles. Les aquifères profonds constituent une solution envisageable dans des secteurs à nappes superficielles inexistantes ou peu importantes.

A la suite d'un bilan des connaissances sur les risques de pollution des eaux souterraines, un plan de prévention et de protection des nappes est proposé.

Mots clés. "Grand Yaéré", Aquifères quaternaires, monocouche (piémont), bicouches (Yaérés), cordon sableux, anomalies piézométriques, ressources et réserves en eaux, exploitation et pollution.

INTRODUCTION GENERALE.

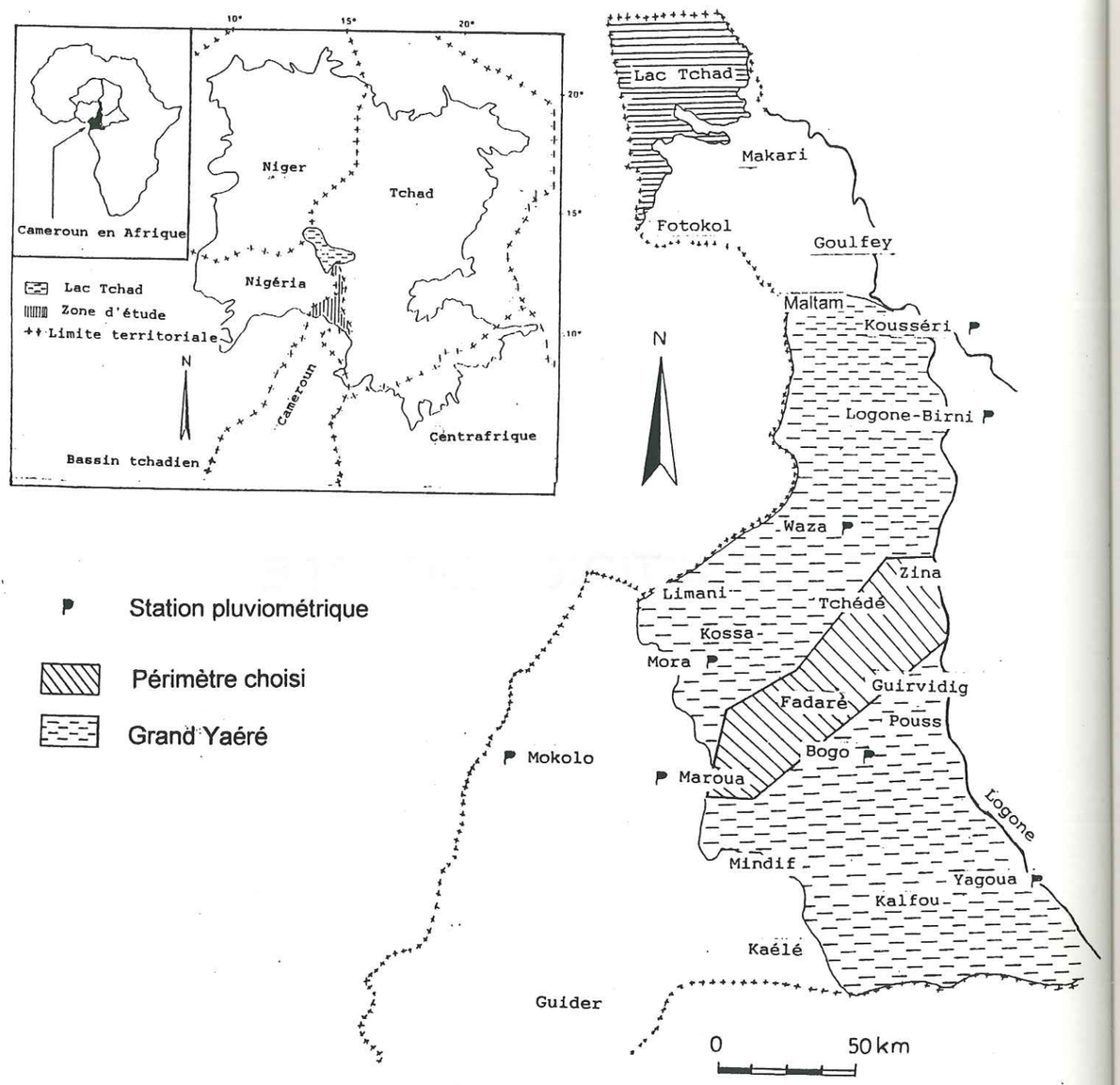


Figure 1.1. - Situation du Grand Yaéré dans le bassin tchadien et dans l'Extrême-Nord du Cameroun.

INTRODUCTION GENERALE.

i) - Problématique.

Au Cameroun, il apparaît que l'eau très abondante dans les domaines tropicaux humides (Sud Cameroun), se raréfie au fur et à mesure que l'on s'approche des domaines tropicaux semi-arides (Nord Cameroun), par un phénomène d'aggravation des conditions climatiques : l'évapotranspiration s'intensifie en même temps que les précipitations deviennent plus faibles et irrégulières.

Il existe encore peu de données permettant de préciser l'évolution de cette raréfaction, phénomène complexe qui met en jeu des facteurs multiples : ceux du climat, ceux de la végétation et ceux du sol.

En définitive, les eaux souterraines qui présentent par rapport aux eaux de surface le double avantage de permettre de faire face au mieux à la demande et de n'accuser les sécheresses qu'avec un certain déphasage, ont un rôle très important dans la stratégie de mise en valeur des ressources hydriques des domaines semi-arides.

L'explosion démographique, le développement touristique et le progrès social en multipliant leurs effets, ont augmenté les besoins en eau et les exigences de qualité dans des proportions qui n'ont cessé de croître au cours des dernières années. Compte tenu de cette situation, le développement rapide des campagnes d'hydraulique villageoise dans le Nord Cameroun est devenu un facteur essentiel pour les gouvernements.

Depuis près de quatre décennies, plusieurs études et travaux ont été effectués en matière de ressources hydrauliques **dans le Grand Yaéré en particulier** (figure 1.1), et dans la province de l'Extrême-Nord du Cameroun en général.

Les études hydrologiques ont permis d'avoir une connaissance de base des principaux cours d'eau, permettant ainsi de définir les différents régimes hydrologiques et de procéder aux applications pratiques sur les aménagements hydro-agricoles (SEMRY, SODECOTON ...) et sur les adductions d'eau des villes (cas de la ville de Mokolo ou l'on consomme de l'eau de surface traitée).

Les travaux de prospection et d'exploitation des eaux souterraines ont été amorcés en 1954. En raison de la complexité des caractéristiques géologiques des aquifères, les connaissances hydrogéologiques sont restées très générales et souvent imprécises. Ainsi, au fur et à mesure que de nouvelles exploitations sont envisagées, la mise en valeur des eaux souterraines se heurte à de nombreux problèmes demeurés sans solution ou peu abordés par les études antérieures.

Au plan économique, la prospection des eaux souterraines, les opérations de forage et de creusement des puits sont en général difficiles et coûteuses en raison de la dispersion des villages et de l'importance des profondeurs à atteindre.

Au plan hydrogéologique, les conditions climatiques, géologiques, hydrologiques et hydrodynamiques qui déterminent le comportement des différentes nappes demeurent encore mal connues. Les zones d'ombre concernent essentiellement :

- les relations d'interdépendance entre les aquifères d'une part, et entre les eaux de surface et les eaux souterraines d'autre part. Il s'agit donc de rechercher les principales zones possédant un certain potentiel d'infiltration;

- la part de l'eau de pluie qui participe effectivement à la recharge des réserves hydriques des sols, les mécanismes de l'alimentation des aquifères et de circulation des eaux souterraines;

- le rôle hydrogéologique du cordon sableux Limani-Yagoua dans la circulation des eaux souterraines, l'origine des baisses de niveaux piézométriques et la présence d'anomalies piézométriques;

- l'évaluation des réserves et des ressources en eaux souterraines disponibles et leurs modifications liées aux conditions climatiques, ainsi que les meilleurs moyens de leur utilisation à moyen et à long terme;

- l'action des aménagements hydroagricoles et hydropastoraux sur la qualité des eaux souterraines dans le "Grand Yaéré".

Le "**Grand Yaéré**" tire son nom des vastes plaines de la cuvette tchadienne temporairement soumises pendant la saison des pluies aux inondations par les eaux de débordement des cours d'eau et les eaux de ruissellement. Ces plaines sont généralement inaccessibles quelques mois après la saison humide. **Elles couvrent la majeure partie de la province de l'Extrême-Nord du Cameroun.**

ii) - <u>Objectif et Contenu de l'étude</u>.

L'objectif principal de notre contribution à l'amélioration de la connaissance des systèmes aquifères du Grand Yaéré est **l'étude de leur fonctionnement hydrodynamique.**

Pour satisfaire à toutes les analyses que commandait ce sujet, la méthode de travail a comporté plusieurs phases : des travaux préliminaires, des travaux de terrain et des travaux de laboratoire. Les études préliminaires ont compris, outre un important travail bibliographique, une initiation aux techniques isotopiques, ainsi qu'à la géostatistique et à la modélisation numérique.

Devant la masse de données recueillies au cours de nos travaux de terrain et de recherche bibliographique, nous avons

fait appel à plusieurs Logiciels pour leurs traitements. **A partir de l'interprétation des données, ce mémoire essaye de mieux caractériser les aquifères afin de disposer des meilleurs moyens permettant ensuite une optimisation de leur exploitation à moyen et à long terme.**

Ce travail comprend trois parties subdivisées en chapitres. La première partie consiste en une **reconnaissance générale du Grand Yaéré.** Elle contient trois chapitres consacrés au milieu physique, à l'hydroclimatologie et à l'hydrogéologie. Dans le premier chapitre, après quelques généralités d'ordre essentiellement géographique et géomorphologique, nous avons fait la synthèse des connaissances géologiques. L'aspect purement hydrogéologique débute dans le deuxième chapitre par une étude des facteurs du climat, puis par la description et l'analyse du régime des eaux de surface. L'ensemble des résultats acquis et des hypothèses émises en géologie et en hydrologie pour rendre compte des différentes unités est analysé et discuté systématiquement à chaque étape, dans le troisième chapitre, pour en arriver à la **synthèse des connaissances sur chaque entité hydrogéologique.**

La deuxième partie est consacrée à l'**étude de la portion des systèmes aquifères du Quaternaire qui a été choisie pour discuter de la problématique du fonctionnement des systèmes aquifères du Grand Yaéré et du développement des ressources en eaux de ces systèmes.** Elle contient trois chapitres. Dans le premier chapitre, l'**inventaire systématique des points d'eau** en aidant à la corrélation précise entre les formations en divers points de la région, a permis d'**identifier les aquifères**, leurs limites, de reconnaître leurs caractères et leurs structures d'ensemble. Les deux autres chapitres de cette partie sont consacrés respectivement à l'**hydrochimie et à la géochimie isotopiques. Ils ont pour but de conforter les principes du fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères du Quaternaire dégagé dans le chapitre précédent.**

Le troisième volet et le dernier de ce travail, comporte trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à deux sujets importants : **le cordon sableux et les anomalies piézométriques.** Le deuxième procède de la **quantification systématique des ressources et des réserves** à partir des données hydrologiques et hydrogéologiques. Ce chapitre propose des travaux complémentaires là où les renseignements apparaissent fragmentaires et approximatifs ou sont totalement inexistants. Le dernier chapitre apporte des informations sur le **rôle que les différents aquifères** du Grand Yaéré sont à même de jouer **dans une exploitation optimale des ressources en eau.** A la suite d'un **bilan des connaissances sur les risques de pollution des eaux souterraines,** un plan de prévention et de protection des nappes est également proposé dans ce chapitre.

PREMIERE PARTIE

LES CARACTERISTIQUES GENERALES DU GRAND YAERE.

Le Sud Cameroun plonge ses racines dans une terre riche en eau. Il est priviligié de ce point de vue par rapport au Nord Cameroun.

Chapitre 1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CADRE GEOLOGIQUE DE L'ETUDE.

Chapitre 2. CADRE HYDROCLIMATIQUE.

Chapitre 3. CARACTERES GENERAUX DES AQUIFERES.

Chapitre 1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CADRE GEOLOGIQUE DE L'ETUDE.

1.1. Aperçu géographique et géomorphologique.
1.2. Contexte géologique.
1.3. Conclusion.

1.1. Aperçu géographique et géomorphologique.

1.1.1. Situation géographique.

Le Grand Yaéré, région qui fait l'objet de cette étude, est situé du point de vue géographique, entre 10°10' et 12°00' de latitudes Nord et 14°10' et 15°10' de longitude Est. Il est délimité (cf. figure 1.1) :

- au Nord par une transversale passant entre Kousséri et Maltam. Cette limite qui naturellement se situe en bordure du lac Tchad a été définie ainsi parce qu'elle correspond sensiblement à la limite du bassin des eaux de surface; l'El Beïd représentant la fermeture du bassin. Le domaine situé au Nord de Kousséri ne fait pas partie de notre propos, mais il pourra contribuer à justifier certaines descriptions ou synthèses de notre mémoire;

- au Sud et au Sud-Ouest, par des affleurements du socle;

- à l'Ouest par les reliefs du Mandara, par le Mayo Kérawa et conventionnellement par la frontière Nigéria-Cameroun;

- à l'Est, par le Logone, rivière qui constitue une artère d'échange entre le Tchad et le Cameroun.

Régionalement, le Grand Yaéré s'étend dans ses limites Est et Ouest sur les territoires du Tchad et du Nigéria.

La région ainsi définie présente une mosaïque de sols. Les plus fréquents sont les sols hydromorphes et les sols ferrugineux tropicaux. Ceux-ci sont associés localement aux sols sodiques et aux sols peu évolués. La végétation présente deux aspects liés essentiellement au régime hydrologique et aux sols : les savanes arbustives ou arborées et les prairies herbeuses (**Ngounou Ngatcha**, 1990).

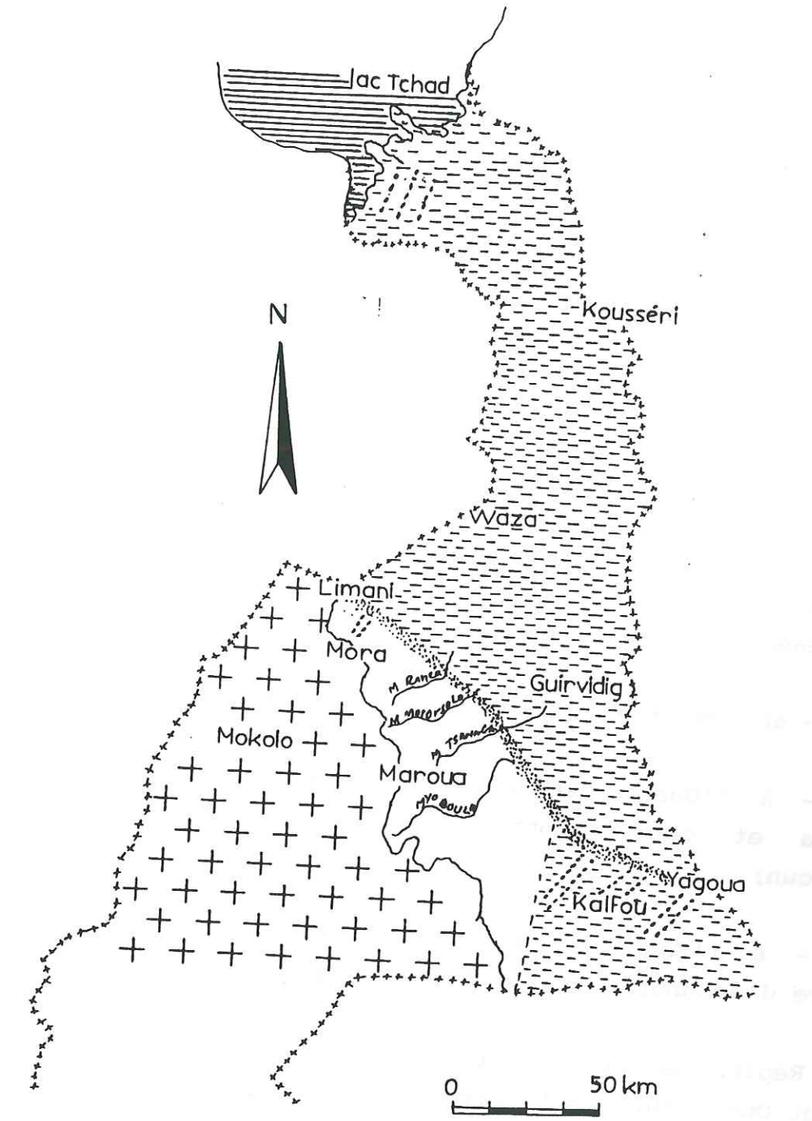


Figure 1.2. - Carte de localisation des principales unités morphologiques du Grand Yaéré.

D'après les données du 2e recensement de la population de 1987, l'Extrême-Nord du Cameroun contient 1.856.000 d'habitants, soit environ 18 % de la population totale du Cameroun (10.493.655). Cette population est composée de plusieurs groupes ethniques inégalement répartis et dont les plus dominants sont les Foulbés, les Arabes choas, les Kotokos, les Massas, les Toupouris... Les zones de forte densité sont situées autour des Monts Mandara et les buttes.

L'économie de la région est basée sur l'agriculture et l'élevage. Le coton est la principale culture industrielle. Les autres cultures sont : l'arachide, le riz, le mil et le sorgho. Grâce au Parc national de Waza, le tourisme constitue un important atout pour le Grand Yaéré. Cette région ne présente que de faibles variations topographiques.

1.1.2. Aspect morphologique.

Sur le plan morphologique, l'ensemble qui se dégage le mieux est le cordon sableux Limani-Yagoua, qui coupe le Grand Yaéré en deux entités différentes : en amont la plaine de piémont et en aval la plaine des Yaérés (figure 1.2).

1.1.2.1. La plaine de piémont.

La plaine de piémont résulte de la sédimentation des produits arrachés aux Monts Mandara sous l'action de l'intense érosion fluvio-torrentielle à laquelle ils ont été soumis. Elle est située entre les contreforts des Monts Mandara et le cordon sableux. Sa limite Est suit la ligne de séparation des départements du Diamaré et du Mayo Danay.

Cette plaine couvre une superficie de l'ordre de 6000 km². Elle est entaillée par un réseau hydrographique dense caractérisé par des cours d'eau à caractère torrentiel et temporaire. On observe sur cette plaine quelques massifs isolés. Elle se prolonge en aval du cordon par de vastes dépressions.

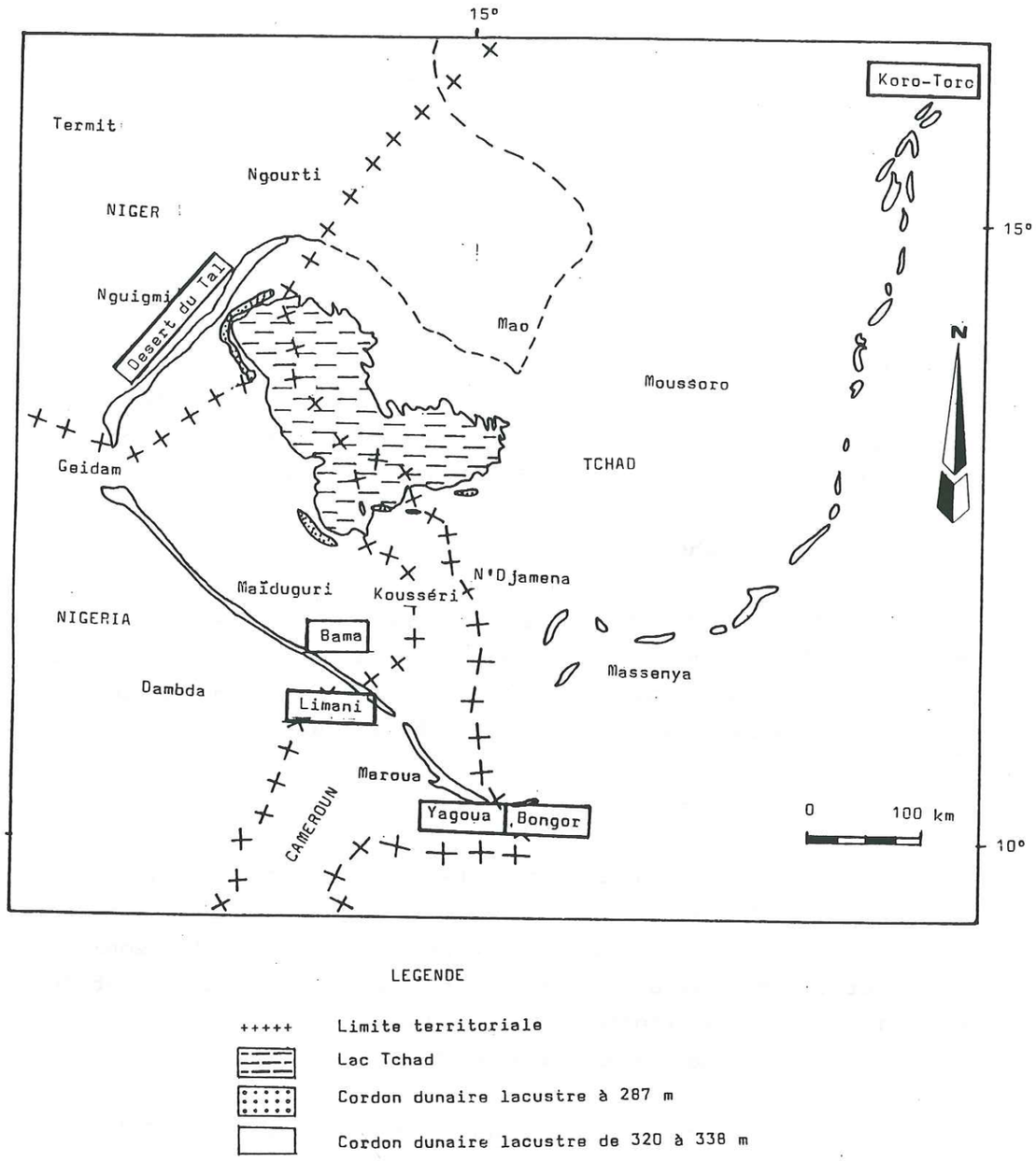


Figure 1.3. - Carte de situation des cordons dunaires de la cuvette tchadienne (d'après **CBLT/PNUD/UNESCO** 1969, simplifié).

1.1.2.2. La plaine des Yaérés.

Elle s'étend de l'aval du cordon jusqu'aux abords du lac Tchad. La région du "Bec de canard" se rattache à cette plaine. Les Yaérés y occupent une superficie de plus de 10000 km². Cette plaine a de très faibles pentes, inférieures à 2/1000. L'altitude générale y varie de 320 m au niveau du cordon à 283 m aux rives du lac Tchad. Les altitudes les plus élevées se rencontrent à Waza où existent trois collines qui culminent à 508 , 425 et 395 m. En dehors de ces trois reliefs, les buttes qui longent le Logone-Chari constituent avec les dunes, les éléments dominants du paysage.

1.1.2.3. Les systèmes dunaires.

i) Le cordon sableux Limani-Yagoua.

Entre Limani et Yagoua, il existe un cordon sableux long d'environ 175 km avec une orientation générale SE-NW. Ce cordon est constitué de sable quartzeux blanc, de granulométrie fine et généralement très pauvre en argile.

Il présente une largeur de 2 km en moyenne et compte en général un à trois cordons dont le sommet culmine à 320 m et dont la base se situe entre 306 m et 310 m. Le profil topographique haut de 10 à 12 m, est dissymétrique, moins raide vers l'aval, avec des pentes douces comprises entre 3 et 15 %. Son âge, indirectement daté par la transgression correspondante, se situerait entre 5260 et 6500 ans BP (**Brabant** et **Gavaud**, 1985).

On retrouve ce type de formation au Tchad où il est connu sous le nom de "cordon Bongo-Koro-Toro", au Nigéria "Bama Ridge" et au Niger "cordon de Tal" ou "désert du Tal" (figure 1.3). Suite aux interrogations que suscite la présence généralisée des cordons dans la cuvette tchadienne, nous envisageons d'y revenir plus en détail dans le chapitre 7 de

ce mémoire. Le cordon sableux Limani-Yagoua et les massifs rocheux environnants encadrent des dunes de sable.

ii) Les autres dunes.

Il s'agit des dunes formées de sables fins siliceux, à tri et à modelé éoliens, rouges et jaunes. Elles sont en général orientées SW-NE et séparées par des dépressions argileuses inondées en saison des pluies. Cette série de dunes est surtout developpée entre Moulvoudaye-Kalfou et Yagoua. On en trouve également dans la région de Mora et en bordure du lac Tchad.

Chaque dune, longitudinalement orientée vers le Sud-Ouest, peut atteindre jusqu'à 30 km de long, sur 700 m de large seulement. Le relief transversal est très adouci. Les hauteurs sont de 10 à 15 m au plus, de 7 m en moyenne et les pentes, concavo-convexes sont de 5 % au plus et de 2,5 % en moyenne. Les côtes vont de 335 à 400-430 m. Malgré leur faible importance, ces dunes marquent bien l'histoire géologique de la région.

1.2. Contexte géologique.

Contrairement au Sud Cameroun ainsi qu'à la partie nigérienne et tchadienne du bassin du Tchad, très peu d'études ont été faites sur la géologie du Grand Yaéré. Les travaux de reconnaissance les plus importants sont ceux de **Barbeau** (1956), **Dumort** et **Peronne** (1966) et de **Pias** (1970).

Nous avons essayé d'établir la correspondance entre nos observations de terrain et celles des auteurs anciens. Nos observations ont été guidées par les coupes lithologiques des forages, les cartes topographiques au 1/200000e, les cartes géologiques de reconnaissance de Maroua et de Fort Lamy, l'étude photogéologique à l'échelle 1/50000e. Pour compléter les observations directes, nous avons eu recours à quelques géologues, hydrogéologues, pédologues, foreurs ...

1.2.1. Aperçu de l'histoire géologique.

Du point de vue géologique, le Grand Yaéré appartient par les affleurements de roches cristallines et cristallophylliennes, au socle Panafricain, et par les formations sédimentaires à la cuvette tchadienne. Les principales phases de l'histoire géologique de cette région peuvent se résumer comme suit (figure 1.4) :

- à la fin du Protérozoïque supérieur (orogenèse Panafricaine 550±100 MA), une importante phase de métamorphisme général a affecté les roches du Précambrien. Ces roches ont été migmatisées et granitisées;

- entre le Précambrien et le Cénozoïque (pendant plus de 300 MA environ), on ne trouve pas de trace de sédimentation dans le Grand Yaéré, sauf à Ngodeni où il existe une dépression allongée, profonde de plus de 1000 m dont les premiers dépôts sont attribués au Crétacé supérieur;

- à l'Oligo-Miocène, la cuvette tchadienne aurait commencé à s'individualiser (**Faure**, 1966 in **Durand** et **Mathieu**, 1980). Pendant cette individualisation se serait mis en place un ensemble formé de grès argileux, de sables et d'argiles;

- à la fin du Cénozoïque, une subsidence épirogénique aurait favorisé l'affaissement du bassin; cette subsidence a été marquée par la genèse des formations plio-pléistocènes anciennes. Pendant le Cénozoïque, les rejeux de failles profondes mises en place au cours de l'orogenèse Panafricaine ont favorisé l'émission d'un magmatisme plutonique et d'une activité volcanique accompagnée de venues trachytiques;

- au Quaternaire, il s'est produit le dépôt de séries fluviatiles à fluvio-lacustres, le tracé du réseau hydrographique actuel et l'implantation du cordon sableux et des dunes sableuses. Actuellement, le Grand Yaéré se remplit

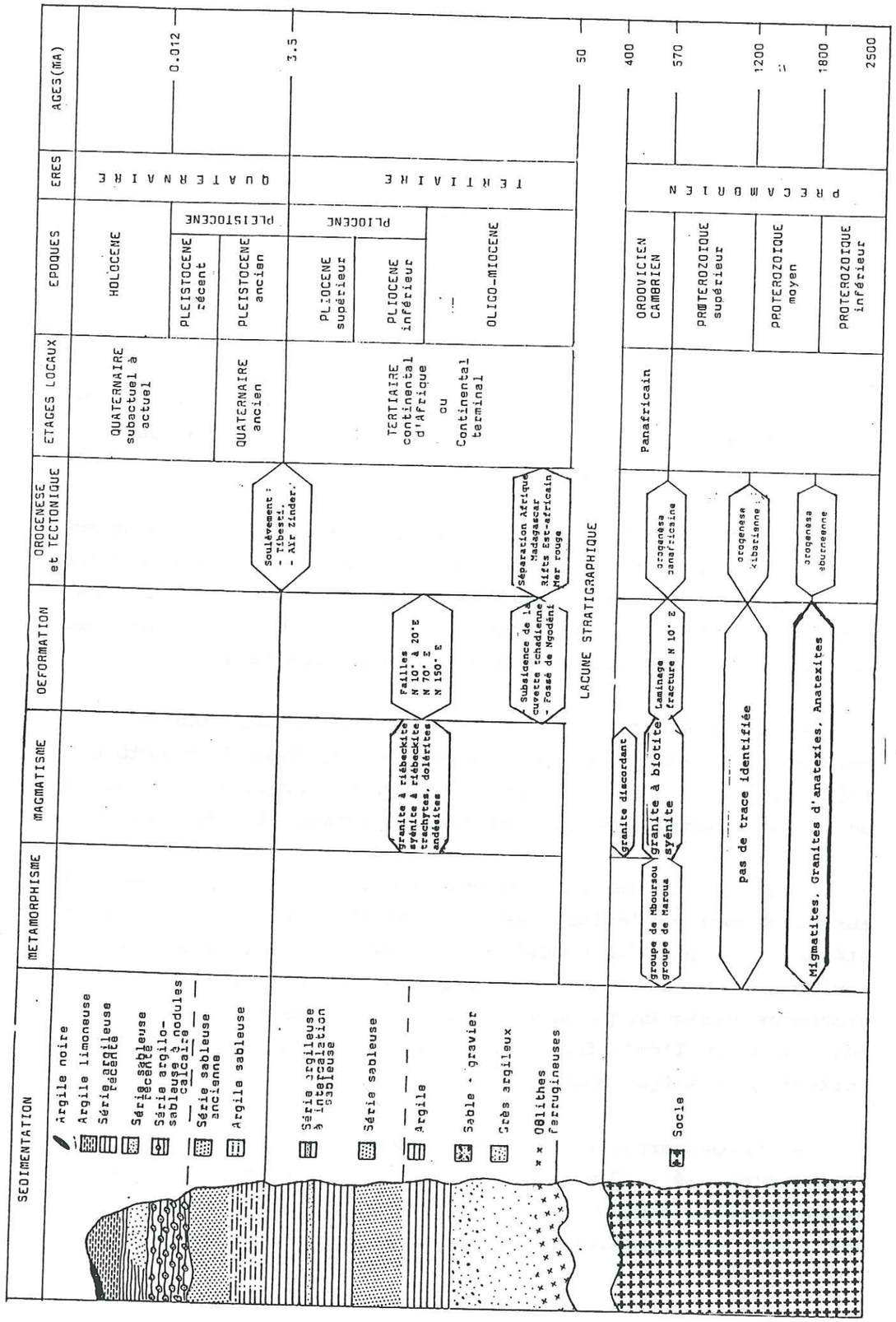


Figure 1.4. - Tableau synoptique de l'histoire géologique du Grand Yaéré (Ngounou Ngatcha B., 1993).

d'alluvions grâce aux inondations du Logone, des mayos et de leurs affluents respectifs.

1.2.2. Les roches du substratum.

Ces roches constituent les affleurements les plus représentatifs dans les limites Sud et Sud-Ouest du Grand Yaéré (figure 1.5). Leur domaine d'affleurement déborde du cadre de notre étude. Cependant, comme ils forment l'ossature géologique des terrains sédimentaires qui nous intéressent, il convient d'en faire un bref aperçu.

1.2.2.1. Les formations anté-panafricaines : les migmatites.

Les migmatites regroupent les gneiss embréchites, les anatexites et les granites d'anatexies (**Dumort** et **Peronne**, 1966). Les gneiss embréchites sont les faciès dominants. Puis viennent les anatexites et enfin les granites d'anatexies. Toutes ces roches sont visibles au sein d'un même massif. Dans les gneiss embréchites et les anatexites, on observe fréquemment des quartzites et des diopsidites.

Toutes ces roches forment le complexe de base. Elles résultent probablement de l'orogenèse éburnéenne; leur âge pourrait se situer entre 2500 et 1800 MA.

1.2.2.2. Les formations panafricaines et post-panafricaines.

Elles regroupent d'une part des roches plutoniques distinctes par leurs âges (Précambrien et Cénozoïque) et leurs faciès, et d'autre part, le groupe volcano-sédimentaire de Maroua (Post-Panafricain).

i) - <u>Les roches plutoniques</u>.

<u>Les granites calco-alcalins</u>. Ce sont des granites discordants, à texture et composition minéralogique très hétérogènes. Dans le Grand Yaéré, ces granites pointent

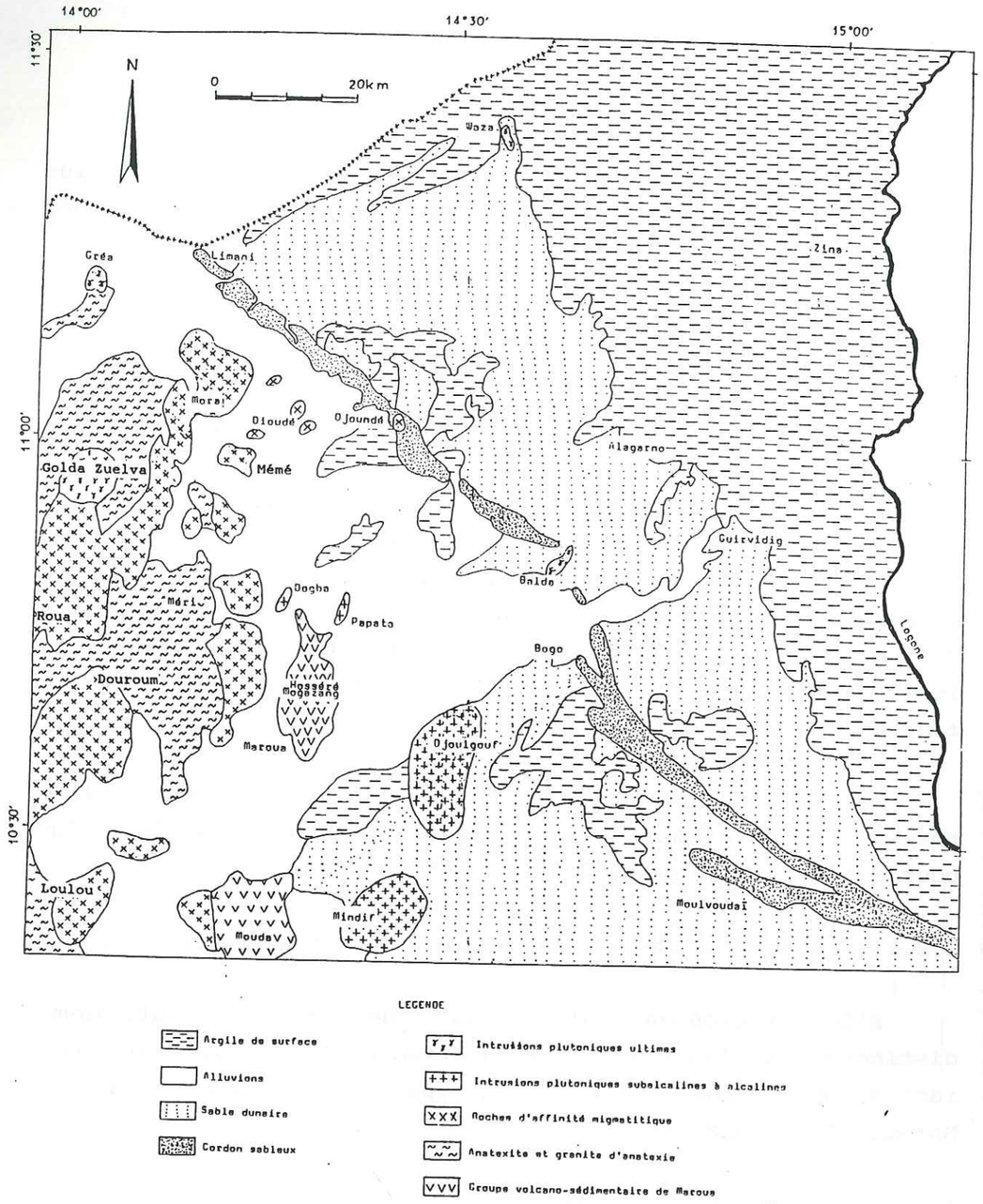


Figure 1.5. - Carte géologique du secteur Sud du Grand Yaéré (d'après **Dumort** et **Peronne** 1966, simplifié).

sporadiquement à Djoundé, Dioudé et Mémé sous forme d'inselbergs appélés localement "hossérés". Dans les massifs encaissants (migmatites), ils se présentent en bandes allongées de direction conforme à celles des migmatites.

Ces granites présentent des analogies de faciès avec les granites de type GODE au Centre-Ouest de Poli que **Toteu** (1984 in **Djeuda**, 1987) considère comme un vaste ensemble marquant l'épisode magmatique terminal du cycle Panafricain.

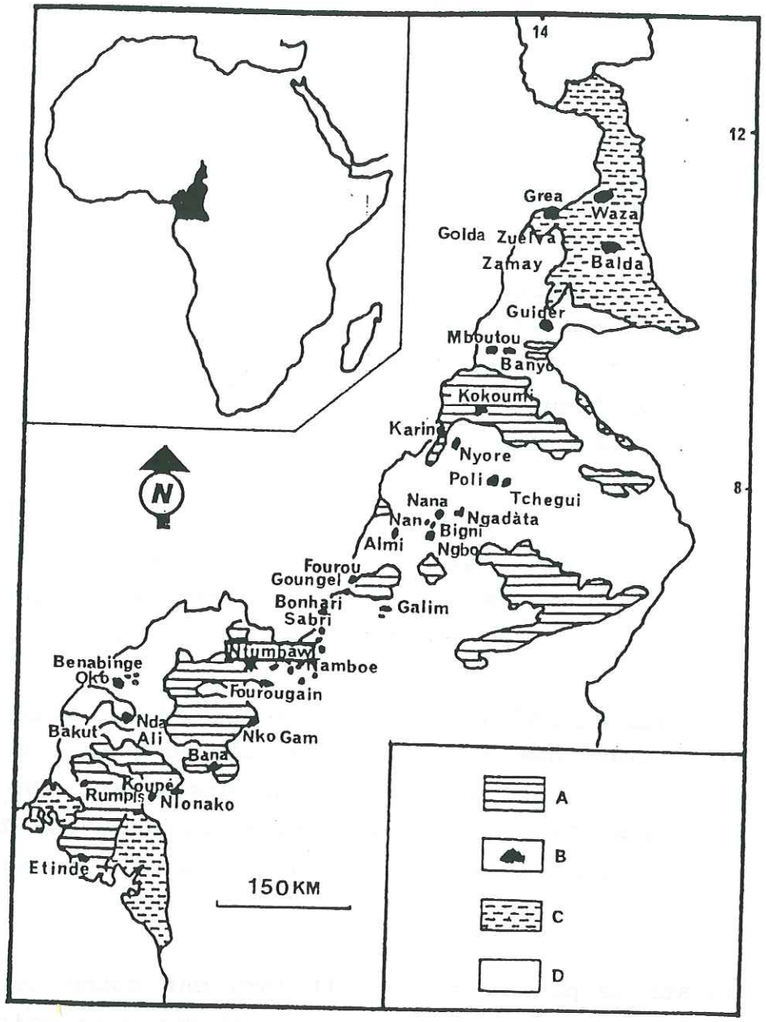
Les granites subalcalins à alcalins. **Dumort** et **Péronne** (1966) groupent dans cette rubrique divers granites qui n'ont en commun que leur relative alcalinité. Ils affleurent au sein des sédiments à Djoulgouf, Papata et Dogba. Le massif de Djoulgouf est le plus important par son extension à l'affleurement dans la région.

L'âge de ces granites est encore inconnu. Macroscopiquement, ils présentent des caractéristiques des granites calco-alcalins ou des granites "ultimes".

Les granites "ultimes" et les roches volcaniques associées. Ce sont des massifs d'âge cénozoïque, homogènes, anorogéniques et en gisement nettement discordant avec leur encaissant. Ils affleurent à Gréa, Balda, Waza, Golda Zuelva. Ils comprennent des roches de nature variées : granites ou syénites.

Des datations par la méthode (Rb/Sr) sur roche totale du complexe de Golda Zuelva (44 km²) ont donné des âges voisins de 35 MA (**Lassere**, 1967).

Les roches volcaniques apparaissent en étroite relation avec les zones de fracture. Elles soulignent avec les granites "ultimes", dans l'ensemble du territoire camerounais, du Sud au Nord suivant une orientation SW-NE, un réseau d'accidents appelé "ligne du Cameroun" (figure 1.6).



Location of the anorgenic complexes in Cameroon showing the position of the Ntumbaw complex (A = volcanic rocks, B = younger granites, C = sedimentary rocks, D = basement complex).

Figure 1.6. - Carte de localisation des massifs anorogéniques suivant la "ligne du Cameroun"
(d'après **Ghogomu R.; Moreau C.; Brown W. L.** et **Rocci G.**, 1989).

ii) - <u>Le groupe volcano-sédimentaire de Maroua</u>.

Le terme volcano-sédimentaire regroupe des formations de lithologies diversifiées allant des roches sédimentaires (schistes argileux, schistes tufacés, quartzites, chloritoschistes...) à des roches volcaniques (andésites, dacites, rhyodacites, brêches dacitiques et andésitiques).

Ces roches renferment sous forme d'enclaves, des granites calco-alcalins et des quartzo-diorites. La présence de telles enclaves laisse penser que ce groupe comparativement au granite calco-alcalin qui est d'âge panafricain, serait d'âge post panafricain. Dans ce contexte, son rapprochement par **Dumort** et **Peronne** (1966) avec le vulcano-sédimentaire birrimien d'Afrique de l'ouest et la série de Poli telle que décrite par **Koch** (1959a) n'est pas justifié et devrait être abandonné.

La présence d'une part des andésites dans la fraction volcanique et d'autre part des schistes tufacés dans la fraction sédimentaire et enfin la position du groupe volcano-sédimentaire de Maroua par rapport au Précambrien confortent l'idée d'un rapprochement avec le groupe de Magbeï (Post Panafricain) dans le Sud du Grand Yaéré, région de Poli.

1.2.3. Les terrains du Cénozoïque.

1.2.3.1. Approche critique sur la définition du Continental terminal.

Par définition, le terme **Continental terminal** ou Tertiaire continental d'Afrique est une expression utilisée pour la première fois par **Kilian Conrad** en 1931 pour désigner les formations détritiques continentales d'âge cénozoïque dans les bassins intérieurs sahariens (Algérie) et sur leurs bordures.

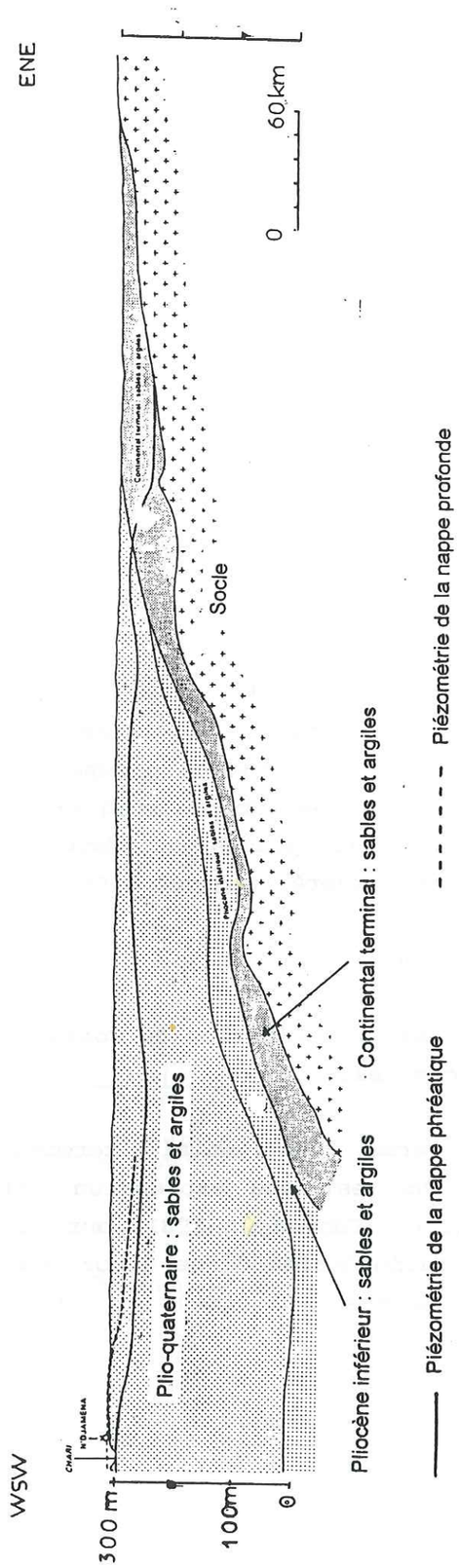


Figure 1.7. - Coupe schématique du bassin du Tchad
(d'après **Schneider**, 1970 in **Guiraud R.**, 1988).

Dans la cuvette tchadienne en général et le Grand Yaéré en particulier, **FAO/UNDP** (1973) a individualisé le Plio-Pléistocène comme un seul ensemble dénommé "Formation du Tchad" ou "Chad group". Par ailleurs, la distinction par **Biscaldi** (1970); **Tillement** (1970); **FAO/UNDP** (1973)... entre le Pliocène et le Continental terminal attribué à l'Oligo-Miocène (figure 1.7) n'est pas clairement établie.

La découverte et l'étude de plusieurs gisements à vertébrés dans la partie Sud et Nord du bassin tchadien ont permis une première discussion sur le terme de passage du Pliocène au Quaternaire (**Servant**, 1983; **Servant-Vildary**, 1978; **Durant** et **Mathieu**, 1979-80; 1980).

La présence d'os de vertébrés (Hippopotamus imaguncula) datés du Pléistocène inférieur à 50 m de profondeur dans un forage situé à Maïduguri (Nord Nigéria) a facilité la compréhension des logs de forages profonds.

Sur les coupes de forages profonds réalisés par **FAO/UNDP** en 1971 dans le Grand Yaéré et dont la synthèse est présentée sur la figure 1.4, les sédiments lacustres du Pliocène ne présentent que de fines intercalations sableuses tandis que les dépôts quaternaires qui les surmontent sont caractérisés par une prédominance de sables dans lesquels s'intercalent les couches lacustres lenticulaires.

Compte tenu des faits précédents, la division des anciens auteurs qui traduit une rupture de l'équilibre dans l'échelle stratigraphique locale, n'est plus justifiée.

En nous rattachant strictement à la définition de Kilian qui a été reprécisée dans le cadre du projet n°127 **P.I.C.G/U.N.E.S.C.O** au cours de sa réunion de Zaria en 1978 - "le Continental terminal regroupe des sédiments d'origine continentale post-éocène et anté-quaternaire" -, ainsi que par les travaux de **Lang** et al (1990) sur le Continental terminal en Afrique de l'Ouest, **nous désignerons désormais sous le**

terme de Continental terminal dans le Grand Yaéré, tous les dépôts allant de l'Oligo-Miocène au Pliocène.

1.2.3.2. L'Oligo-Miocène.

IL est représenté par des sédiments assez grossiers (graviers et grès) coupés de passage plus fins (argiles) et de niveaux ferrugineux (**Biscaldi**, 1970). Les colorations qui caractérisent ces sédiments sont le violet, le rouge, l'ocre, le rose, le jaune et le blanc.

L'Oligo-Miocène a été traversé par quelques sondages et forages sur une épaisseur de 200 à 400 m. Les argiles intercalées dans les sables et les grès deviennent souvent prédominantes à la partie inférieure de cet étage. Les grès argileux et les oolithes ferrugineuses paraissent indiquer selon **Maglione** (1976), un âge oligocène. Ces oolithes sont très dispersées dans les sables et permettent très souvent de distinguer les dépôts de l'Oligo-Miocène de ceux du Pliocène.

1.2.3.3. Le Pliocène.

Il est représenté à sa base (Pliocène inférieur) par une série sableuse que surmonte une épaisse série d'argiles versicolores blanches, beiges, vertes ou bleutées (Pliocène supérieur) dans laquelle s'intercalent des bandes de sables lenticulaires. De telles intercalations considérées comme des sables éoliens ont été signalées dans les couches lacustres des formations Morono (Nord du Tchad).

Cette structure est bien visible sur les coupes de forages profonds de la région de Waza et ses environs, présentées dans le rapport **FORACO** (1987). D'un forage à un autre, on note d'importantes variations d'épaisseur du Pliocène. Ces variations seraient liées selon **Servant** (1983) aux différenciations régionales dans les mouvements de subsidence du Plio-Pléistocène ancien.

1.2.4. Les terrains du Quaternaire.

Le Quaternaire de la cuvette tchadienne est plus ou moins bien connu grâce aux travaux de **Barbeau**, 1956; **Pias**, 1970; **Durand** et **Mathieu**, 1979-1980; 1980; **Gac**, 1980. La discontinuité des faciès; dans le temps (figure 1.8) et dans l'espace ainsi que l'absence de niveaux repères rendent difficile l'étude des sédiments quaternaires du Grand Yaéré.

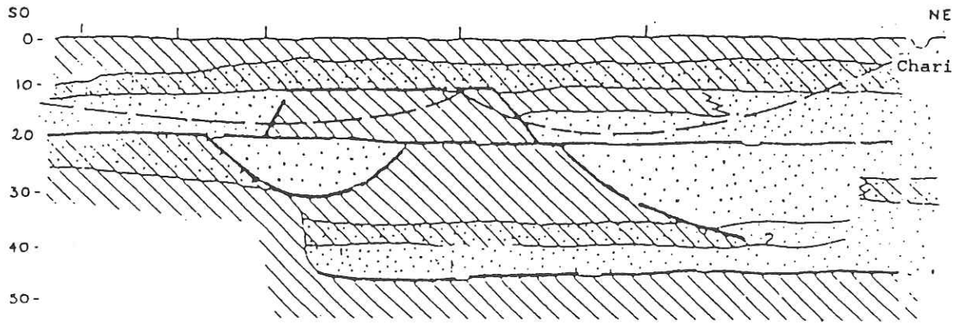
Sur la base des analogies de faciès avec les sédiments observés dans les autres portions de la cuvette tchadienne ainsi que de la présence dans la Plaine des Yaérés, d'une bande d'argile compacte, nous distinguerons au sein du Quaternaire, les formations anciennes et les formations récentes.

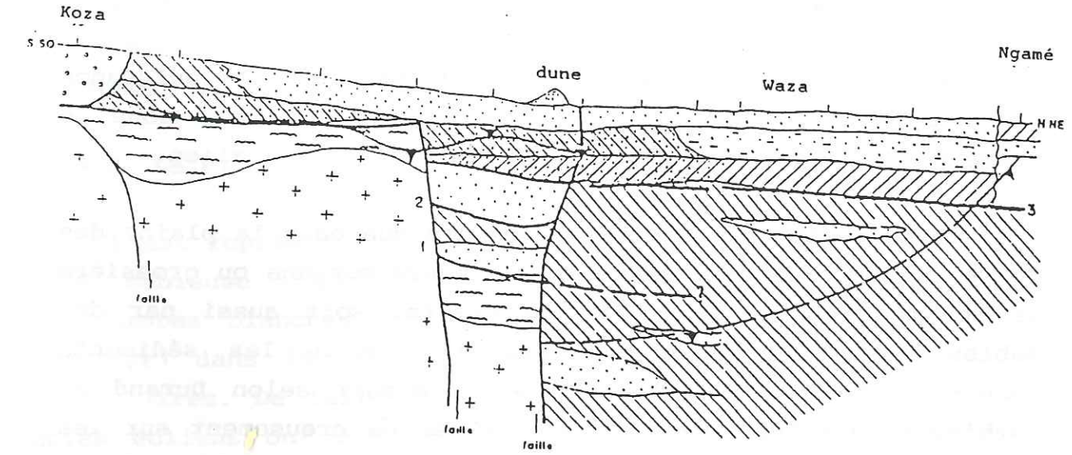
1.2.4.1. Le Quaternaire ancien.

Le Quaternaire ancien est formé de sables d'une puissance dépassant rarement la dizaine de mètre. Il est Connu sous le terme de série ancienne remaniée antérieure au Ghazalien.

Cette série qui ne serait présente que dans la plaine des Yaérés est représentée soit par une phase moyenne ou grossière de sédimentation avec galets de quartz, soit aussi par des sables fins. Cet apport sableux qui couvre les sédiments lacustres du Plio-Pléistocène peut provenir selon **Durand** et **Mathieu** (1979-1980) d'une intense phase de creusement sur les affleurements du bassin méridional, au moment ou s'installent sur le bassin des conditions climatiques plus arides.

La couche d'argile compacte ou d'argile sableuse que nous avons mise en évidence sur les coupes géologiques (figure 1.9) **marque probablement la fin du cycle de sédimentation.**





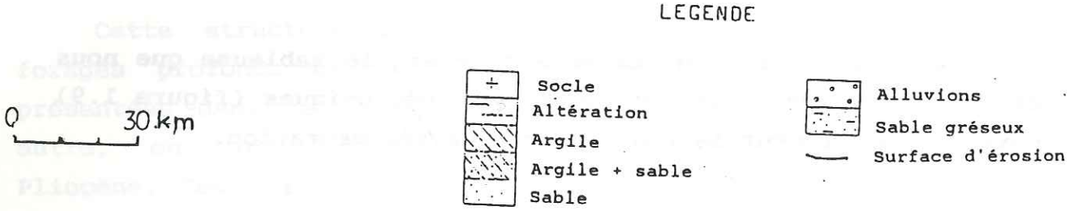
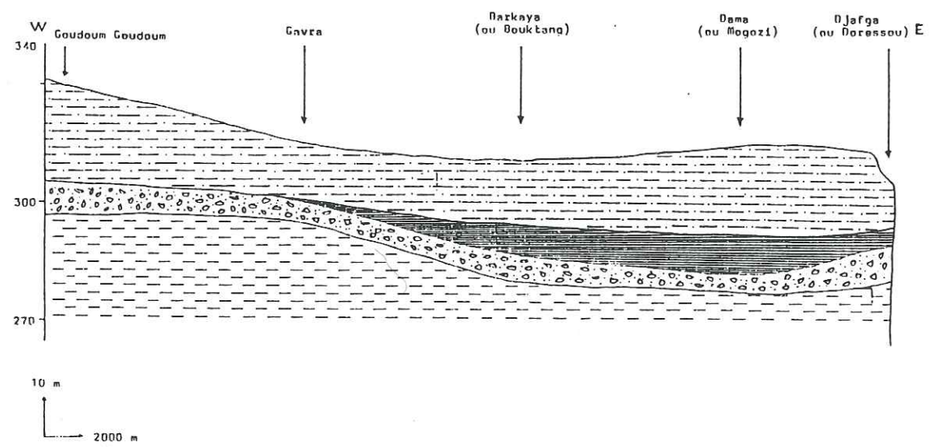


Figure 1.8. - Coupe géologique dans les sédiments quaternaires du Nord Cameroun (d'après **GEOHYDRAULIQUE**, 1986).

Coupe 1. Voir axe de coupe sur la planche A en annexe 1.



Coupe 2. Voir axe de coupe sur la planche A en annexe 1.

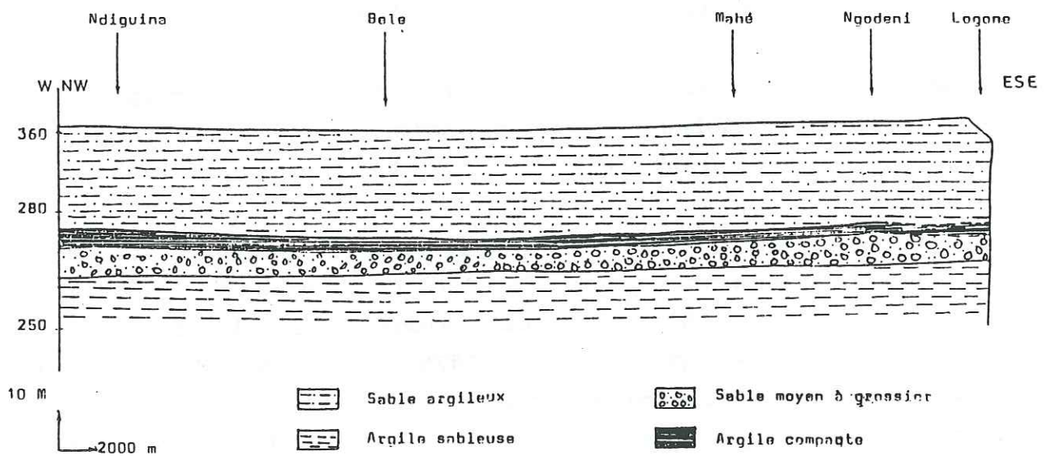


Figure 1.9 - Coupes géologiques à travers le Quaternaire du Grand Yaéré (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

1.2.4.2. Le Quaternaire récent.

On peut distinguer au sein du Quaternaire récent et par ordre d'ancienneté les formations suivantes (cf. figure 1.4) :

i) - La série fluvio-lacustre de base. Le dépôt de cette série s'est réalisé de 30000 à 21350 ans B.P (**Gac**, 1980). Elle est formée d'une couche argilo-sableuse à nodules calcaires d'une dizaine de mètres d'épaisseur en moyenne.

ii) - La série fluviatile récente. Elle débute par des graviers roulés, se poursuit par des sables grossiers riches en feldspaths et se termine généralement par des sables quartzeux grossiers (**Pias**, 1970; **Gac**, 1980).

iii) - La série alluviale subactuelle à actuelle. Cette série est très importante dans les axes hydrographiques. Dans les Yaérés, elle se caractérise par des dépôts limoneux, limono-argileux, argilo-limoneux, les sédiments purement sableux étant très rares. Dans la plaine de piémont, elle montre un mélange de sables fins, moyens à grossiers.

La série alluviale subactuelle à actuelle se superpose, soit à la série sableuse récente, soit à la série argilo-sableuse à nodules calcaires.

iv) - La série argileuse subactuelle à actuelle. Cette série est communément applée "argile de surface", "argile noire" ou "karral". L'analyse minéralogique de la fraction fine de ces sédiments par **Ekodeck** (1976) a montré qu'ils sont composés de montmorillonites ferrifères (Beidellite) comme argile dominante, puis de kaolinite, d'illite et de quelques interstratifications illite-smectite-chlorite.

La nature de ces argiles explique la variation saisonnière de leur état physique : larges fentes de déssication disposées en réseau polygonal allant jusqu'à 1 m de profondeur en saison sèche; et gonflement pendant la saison

humide. Leur nature gonflante et l'existence des fentes de déssication leur confèrent une capacité de retention d'eau élevée. Cependant, les pertes par infiltration sont limitées; ce qui favorise les inondations dont les Yaérés sont les témoins.

1.2.5. Cadre structural.

1.2.5.1. Les directions structurales.

Du point de vue structural, peu de données sont actuellement disponibles sur les formations du socle et les formations de couverture. Les directions structurales d'ensemble qui ont affecté les migmatites et les faciès associés sont SW-NE, SSW-NNE, NS. Ces directions correspondent aux axes des plissements et des anticlinoriums des migmatites et des granites ainsi qu'à des bandes mylonitiques, à des filons de microgranite ou de quartz ou à des fractures sans remplissages.

En zone de couverture, plusieurs anomalies ont été mises en évidence par des méthodes géophysiques. Leurs répartitions font ressortir des directions priviligiées. La principale est sensiblement celle des grandes failles du Cameroun ou "ligne du Cameroun" (cf. figure 1.6). Elle est matérialisée du Sud au Nord par les anomalies de Ngaoundéré, de Bibémi-Léré, et de Waza (figure 1.10). Tous ces accidents qui affectent la couverture sédimentaire sont liés selon **Louis** (1970) à la mise en place des formations volcaniques qui affleurant au Nord Cameroun. On peut également noter parmi ces structures linéamentaires, des alignements de fossés suivant un axe tectonique NNE-SSW qui intègre bien les directions dont résulte la "ligne du Cameroun".

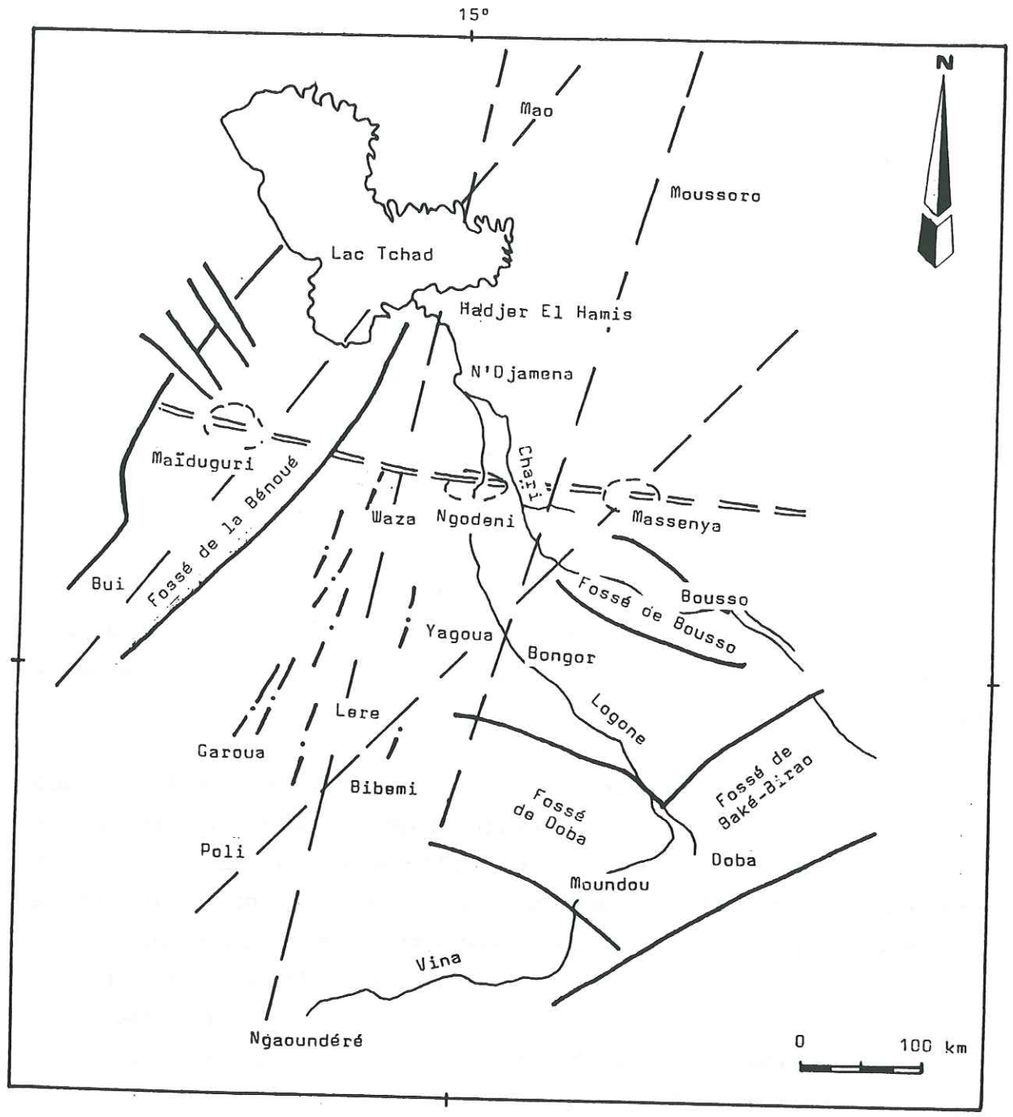


Figure 1.10. - Structures tectoniques majeures au Sud du lac Tchad (inspiré des travaux de **Louis**, 1970; **Bessoles** et **Trompette**, 1980).

1.2.5.2. Le fossé d'effondrement de NGODENI.

Il est situé dans la partie aval du cordon sableux Limani-Yagoua. Ce fossé orienté ESE-WNW est rempli par plus de 1000 m de sédiments dont les premiers dépôts sont attribués par **FAO/UNDP** (1973) au Crétacé marin (figure 1.11).

La direction ESE-WNW, non constante, se place sensiblement dans le prolongement des fossés de Massenya (Tchad) et de Maïduguri (Nigéria) (cf. figure 1.10). Rien pour l'instant ne nous permet de confirmer la continuité de ces fossés. Le fossé de Massenya caractérisé par une anomalie gravimétrique négative, est assimilé à un bassin sédimentaire (**Louis**, 1970).

Aucune étude de détail sur la genèse et la stratigraphie des sédiments attribués au Crétacé du fossé de NGODENI n'a été abordée. Les remarques suivantes permettent de préciser l'évènement qui l'a engendré.

- La direction WNW-ESE du fossé de NGODENI est une des quatre directions (la direction N30°E, la direction WSW-ENE à E-W ou direction de l'Adamaoua, la direction érythréenne WNW-ESE ou N135°E à 142°E, la direction somalienne de Krenkel NS ou N58°E) dont résulte la "ligne du Cameroun". **Il est probable que ce fossé soit lié aux rejeux d'accidents qui ont donné naissance à cette ligne.**

- Les affleurements post-protérozoïques supérieurs à mésozoïques (Crétacé inférieur) sont absents dans ce fossé. Si cette observation est confirmée, cela signifie que le fossé n'existait pas à ces époques. **Ce fossé serait donc contemporain de la phase tectonique de la fin du Crétacé ou du début du Cénozoïque qui a touché le Nord Cameroun et les pays voisins, et dont les autres traces dans la plaque Afrique sont la séparation de l'Afrique et de Madagascar, la naissance de la mer Rouge et des rifts Est-africains.**

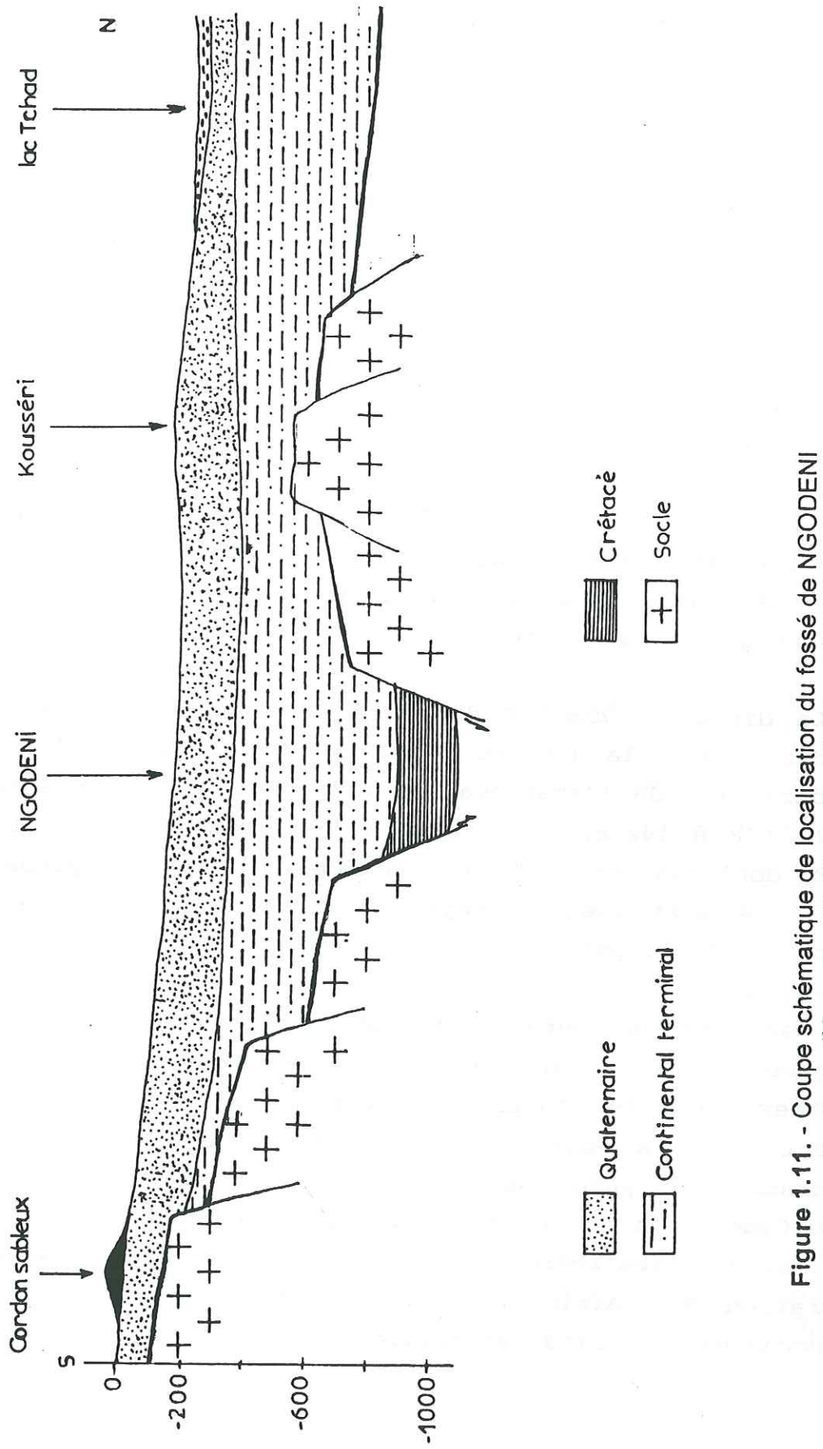


Figure 1.11. - Coupe schématique de localisation du fossé de NGODENI (Ngounou Ngatcha B., 1993).

1.3. Conclusion.

Le Grand Yaéré est une région extrêmement plate. Son relief est constitué de plaines avec des systèmes dunaires bien developpés entre Limani et Yagoua. **La configuration morphologique est en relation avec la nature des formations géologiques.**

Les bordures Sud et Sud-Ouest du Grand Yaéré sont caractérisées par la prédominance à l'affleurement des roches cristallines et cristallophylliennes. Ces roches auxquelles il faut ajouter les massifs granitiques qui pointent sporadiquement dans le Grand Yaéré, se rattachent fort bien à trois des quatre ensembles principaux de roches reconnues et décrites dans le Nord Cameroun et faisant partie de la chaine panafricaine Nord Equatoriale.

Les roches du substratum sont surmontées en discordance par des terrains sédimentaires qui nous intéressent au premier plan. Une lacune assez importante (Protérozoïque supérieur à Cénozoïque inférieur?) souligne cette discordance.

Les terrains du Cénozoïque, plus précisement le Continental terminal, constituent du fait de leur puissance, l'unité géologique principale du Grand Yaéré, voire même de toute la cuvette tchadienne.

La limite supérieure admise jusqu'à présent pour le Continental terminal a été redéfinie. En effet, les sables de base du Pliocène inférieur ne sont pas séparables des sables et argiles de l'Oligo-Miocène.

Il apparait très difficile d'établir une stratigraphie des terrains du Quaternaire. Il s'agit dans l'ensemble de formations très hétérogènes tant dans l'espace que dans le temps.

Somme toute, le schéma d'évolution de la genèse des formations du socle et des formations sédimentaires que nous venons de proposer pour le Grand Yaéré, est proche de ceux établis par divers auteurs au Tchad, au Nigéria et au Niger.

La présence des zones de socle altéré, ainsi que des alluvions et des recouvrements sédimentaires, fait dire que le Grand Yaéré rassemble la totalité des configurations hydrogéologiques caractéristiques du continent Africain. Il reste maintenent à savoir s'il y a assez d'eau dans la région pour permettre à ces différents réservoirs de jouer un rôle efficace.

Chapitre 2. CADRE HYDROCLIMATIQUE.

2.1. Introduction.
2.2. Les conditions climatiques.
2.3. Les principaux paramètres du climat.
2.4. Le réseau hydrographique et le régime des eaux de surface.
2.5. Les caractéristiques du bilan hydrologique.
2.6. Conclusion.

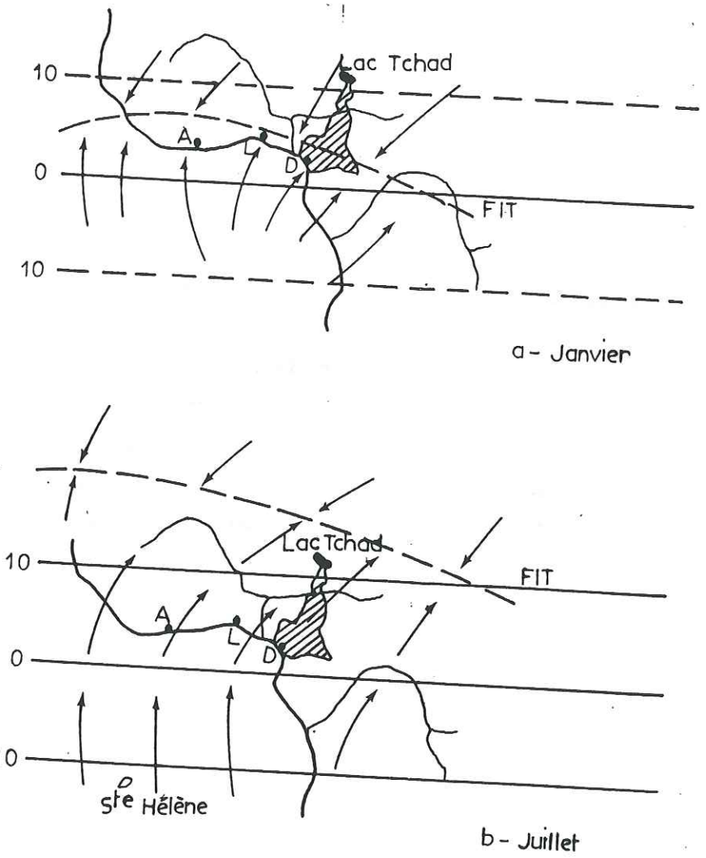


Figure 2.1. - Variations de la position du Front Intertropical au voisinage du Cameroun (in **Martin D.** et **Segalin P.**, 1966).

2.1. Introduction.

La quantité d'eau disponible dans un bassin hydrologique permet d'apprécier, en rapport avec la nature des sols et des variations de leurs réserves en eau, le volume d'eau qui alimente les nappes souterraines. C'est dans cet optique que nous avons envisagé d'aborder dans ce chapitre, l'analyse des différents aspects de la climatologie et de l'hydrologie de surface du Grand Yaéré.

2.2. Les conditions climatiques.

Les variations climatiques dont découlent les régimes de pluies et les écoulements de surface, sont sous la dépendance de deux masses d'air. L'air continental du NE engendré par l'anticyclone saharien donne l'Harmattan; vent sec qui se dirige vers le Sud-Ouest à la saison sèche (octobre-novembre à mars-avril). L'air humide du SW provenant de l'anticyclone de Saint-Hélène. L'avancée de cette masse d'air d'abord NO, puis NE à la traversée de l'équateur constitue la mousson, qui détermine la saison des pluies. Elle atteint sa plus grande extension entre juillet et septembre.

Le contact au sol entre ces deux masses d'air forme le Front Intertropical (F.I.T.). Au cours de l'année, le déplacement de l'Harmattan et de la mousson en latitude se fait entre le 4e parallèle Nord en janvier et le 20e parallèle Nord en juillet-août (figure 2.1). Ce déplacement entraîne une alternance des périodes sèches et humides entre ces deux limites.

En général, la mousson se réchauffe progressivement de sorte que sa continentalisation en direction du Sahara diminue sa forte humidité initiale. Ainsi, au fur et à mesure que l'on pénètre dans le continent, les pluies diminuent le long du front de mousson. Ce déplacement en latitude détermine dans le

Grand Yaéré deux sous climats locaux du climat tropical sec. Ce sont :

- entre le 10e et le 11e parallèle, le type soudanien à nuance sèche. La saison humide dure 4 à 5 mois (mai-juin à septembre) et la saison sèche 7 à 8 mois (octobre à avril). Ce sous climat est quelque peu influencé par les hauts reliefs du Sud-Ouest (Monts Mandara);

- entre le 11e et le 13e parallèle, le type sahélien. Il comprend une saison humide de 3 mois (juillet à septembre) et une saison sèche de près de 9 mois (octobre à juin).

2.3. Les principaux paramètres du climat.

2.3.1. Situation géographique des stations.

Dans le Grand Yaéré, on trouve une station synoptique gérée par l'ASECNA à l'aéroport de Maroua-Salak à 22 km au sud de la ville. Le service météorologique contrôle quatre stations climatiques : Mokolo, Yagoua, Waza et Kousséri. En plus de ces stations, la région dispose de quelques stations pluviométriques dans les localités suivantes : Mora, Balda, Bogo, Doubbel, Logone-Birni, Mokio.

La densité des stations est de une pour environ 1200 km². Comme on peut le constater, le nombre de stations (cf. figure 1.1) par rapport à la superficie de la région (16000 km² environ) est insuffisant. Par ailleurs, à une échelle supérieure à 1/500000e, leur distribution n'est pas assez homogène.

Pour plusieurs stations, la quantité des observations est malheureusement faible. La station de Maroua est la seule à disposer des observations les plus régulières. Ainsi, pour que les données soient facilement comparables entre stations, seules les données postérieures à 1980 ont été retenues. Les données à notre disposition nous ont été fournies

gracieusement par la Direction de la Météorologie Nationale (DMN).

Nous avons procédé à une analyse des précipitations, de l'évaporation et de l'évapotranspiration, des températures, de l'humidité relative et de l'insolation. Pour tous ces paramètres, nous avons calculé, les moyennes annuelles, les moyennes mensuelles, les écarts-type et les coefficients de variations. En ce qui concerne le coefficient de variation, il est présenté dans les différents tableaux du texte sous forme de rapport écart-type sur moyenne annuelle et non exprimé en pourcentage.

2.3.2. Les précipitations.

2.3.2.1. Les précipitations annuelles.

Dans le Grand Yaéré comme ailleurs en Afrique de l'Ouest, la diminution des précipitations du Sud au Nord traduite par une aridité accrue, s'avère extrêmement rapide. Le total des précipitations moyennes interannuelles diminue de 900 mm à 400 mm entre Mokolo et le lac Tchad (figure 2.2).

D'après les travaux de **Olivry** (1986) et **Naah** (1990), on remarque que les déficits pluviométriques enregistrés pendant les périodes sèches de 1983 à 1985 se sont traduits dans la région par un décalage des isohyètes vers le Sud de l'ordre d'une centaine de kilomètres.

Tableau 2.1. Précipitations moyennes annuelles sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

	Maroua	Yagoua	Mokolo	Kousséri	Mora	Waza	Bogo	Logone-B	Balda	Dargala	Mokio	Doubbel	Gazawa
1985	622,00	667,20	1033,80	350,30	539,20	547,20	569,90	383,10	551,00	649,90	647,20	845,00	672,80
1986	473,90	725,10	1031,90	592,90	407,70	595,50	631,00	594,70	417,00	578,90	641,90	708,80	882,10
1987	650,00	753,80	860,20	358,00	475,30	568,10	581,90	485,00	399,00	485,50	485,30	488,30	615,90
1988	746,90	822,70	1081,00	756,60	693,20	706,70	777,30	592,50	692,00	871,00	693,20	739,40	790,60
1989	768,70	797,80	784,10	524,20	684,20	507,60	583,50	553,60	501,00	596,00	634,90	485,30	632,50
1990	691,20	571,70	986,20	284,10	565,70	546,90	480,80	567,40	442,00	516,60	613,20	431,60	996,40
1991	996,00	744,70	1030,40	566,00	741,20	794,90	792,60	696,20			762,20	888,20	

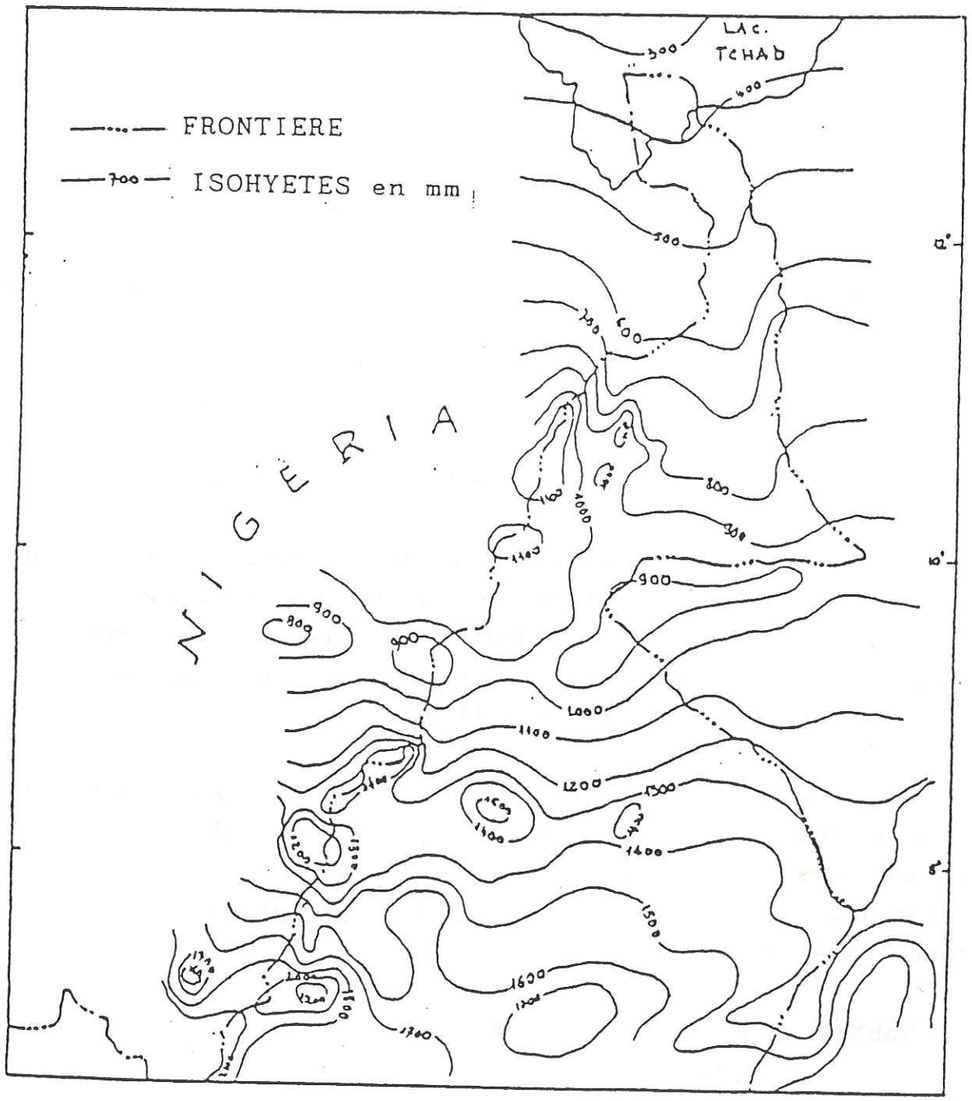


Figure 2.2. - Esquisse des isohyètes interannuelles du Nord Cameroun (période 1976-1985 in **Djeuda**, 1987).

Seul le relief des Monts Mandara conserve une pluviométrie supérieure à 900 mm jusqu'au 11e parallèle comme en témoignent les données de la station de Mokolo (tableau 2.1), située à 1500 m d'altitude tandis que Maroua est à 400 m.

L'évolution de la chronique des précipitations sur les principales stations du Grand Yaéré est exprimée sur la figure 2.3. Les hauteurs moyennes annuelles sur la période de 1985 à 1991 entre les différentes stations étudiées montrent une variabilité spatio-temporelle des hauteurs de pluies d'une station à une autre et d'une année à une autre.

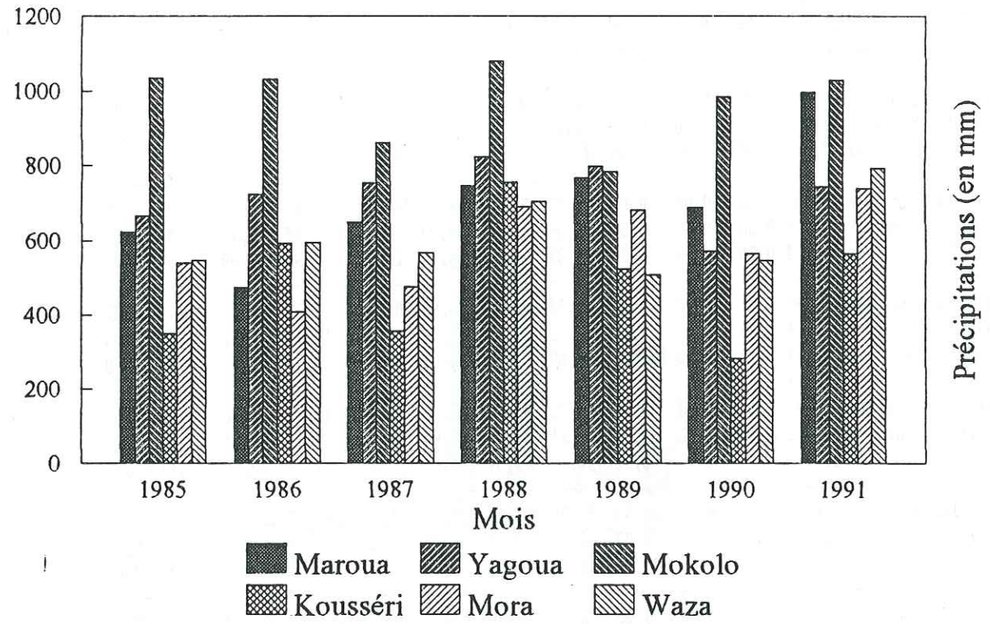


Figure 2.3. Evolution de la chronique des précipitations sur les principales stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Tableau 2.2. - Précipitations moyennes mensuelles sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Localité		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Mora	moyenne mensuelle	0,00	0,00	0,57	4,46	49,94	60,14	129,43	206,13	116,79	19,19	0,00	0,00	586,64
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	1,00	5,69	48,41	22,12	42,31	82,66	67,71	28,05	0,00	0,00	114,56
	coef. variat.	0,00	0,00	174,93	127,59	96,94	36,77	32,69	40,10	57,97	146,20	0,00	0,00	19,53
Bogo	moyenne mensuelle	0,00	0,00	0,00	19,35	55,80	106,61	144,77	180,74	120,04	13,97	0,00	0,00	631,00
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	0,00	14,13	44,21	44,04	55,44	68,89	74,16	11,87	0,00	0,00	105,88
	coef. variat.	0,00	0,00	0,00	73,04	79,23	41,31	38,30	38,11	61,78	84,96	0,00	0,00	16,78
Logone-Birn	moyenne mensuelle	0,00	0,00	3,47	35,77	47,59	171,30	210,87	69,74	30,20	0,00	0,00	0,00	553,21
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	1,39	25,03	12,70	102,23	94,45	43,66	26,90	0,00	0,00	0,00	90,63
	coef. variat.	0,00	0,00	40,06	69,97	26,70	59,68	44,79	62,61	89,06	0,00	0,00	0,00	16,38
Waza	moyenne mensuelle	0,00	0,00	44,00	18,50	49,61	73,31	148,83	201,79	108,69	24,43	0,00	0,00	609,56
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	0,00	16,16	35,53	20,95	60,57	75,29	55,92	3,35	0,00	0,00	95,55
	coef. variat.	0,00	0,00	0,00	87,33	71,61	28,58	40,70	37,31	51,45	13,70	0,00	0,00	15,68
Mokolo	moyenne mensuelle	0,00	0,00	26,80	35,62	94,81	149,29	196,87	309,56	159,97	27,83	7,60	0,00	972,51
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	9,50	18,34	56,69	34,37	47,50	65,70	69,07	20,49	0,00	0,00	100,50
	coef. variat.	0,00	0,00	35,45	51,49	59,79	23,02	24,13	21,22	43,18	73,63	0,00	0,00	10,33
Kousséri	moyenne mensuelle	0,00	0,00	0,45	2,80	34,73	39,10	140,13	177,27	75,74	24,27	0,00	0,00	490,30
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	0,25	6,26	33,33	17,51	59,25	87,12	68,89	24,78	0,00	0,00	154,89
	coef. variat.	0,00	0,00	55,56	223,61	95,97	44,78	42,28	49,15	90,95	102,12	0,00	0,00	31,59
Yagoua	moyenne mensuelle	0,00	0,00	0,00	24,72	57,21	101,06	188,76	220,69	129,67	12,95	0,00	0,00	726,14
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	0,00	25,05	19,12	34,87	45,28	70,48	59,77	13,46	0,00	0,00	78,28
	coef. variat.	0,00	0,00	0,00	101,32	33,43	34,50	23,99	31,94	46,09	103,93	0,00	0,00	10,78
Maroua	moyenne mensuelle	0,00	0,00	0,65	15,22	43,89	128,96	188,73	219,06	99,33	13,77	0,00	0,00	706,96
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	0,65	17,61	31,70	45,85	62,84	64,14	46,11	12,88	0,00	0,00	148,31
	coef. variat.	0,00	0,00	100,00	116,00	72,00	36,00	33,00	29,00	46,00	94,00	0,00	0,00	21,00
Doubbel	moyenne mensuelle	0,00	0,00	0,00	11,35	54,09	92,43	152,53	217,84	94,36	60,80	9,65	0,00	655,23
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	0,00	6,21	41,94	49,94	89,56	76,22	57,11	76,10	4,25	0,00	171,96
	coef. variat.	0,00	0,00	0,00	54,70	77,54	54,03	58,72	34,99	60,52	125,17	44,04	0,00	26,24
Dargala	moyenne mensuelle	0,00	0,00	16,90	25,00	35,68	101,03	146,52	192,97	107,03	17,15	4,20	0,00	616,32
(1985-1990)	écarts-type	0,00	0,00	12,43	22,53	20,22	56,44	57,81	39,29	53,38	10,28	0,00	0,00	125,74
	coef. variat.	0,00	0,00	73,58	90,11	56,65	55,86	39,46	20,36	49,88	59,95	0,00	0,00	20,40
Gazawa	moyenne mensuelle	0,00	0,00	8,00	16,85	51,48	96,18	214,23	222,05	153,63	19,32	7,20	0,00	765,05
(1985-1990)	écarts-type	0,00	0,00	0,00	3,55	14,41	41,92	86,70	68,88	45,45	19,79	0,00	0,00	139,17
	coef. variat.	0,00	0,00	0,00	21,07	27,99	43,58	40,47	31,02	29,59	102,44	0,00	0,00	18,19
Balda	moyenne mensuelle	0,00	0,00	0,00	6,00	25,42	62,00	154,50	160,92	79,50	34,00	0,00	0,00	500,33
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	0,00	0,00	24,55	27,39	54,38	36,94	57,47	13,59	0,00	0,00	99,93
	coef. variat.	0,00	0,00	0,00	0,00	96,60	44,17	35,20	22,96	72,29	39,97	0,00	0,00	19,97
Mokio	moyenne mensuelle	0,00	0,00	1,20	8,12	45,34	85,37	137,53	225,36	126,03	15,10	0,00	0,00	639,70
(1985-1991)	écarts-type	0,00	0,00	0,00	9,34	27,18	36,40	47,56	64,87	76,44	19,49	0,00	0,00	77,91
	coef. variat.	0,00	0,00	0,00	115,11	59,95	42,63	34,58	28,79	60,65	129,06	0,00	0,00	12,18

2.3.2.2. Les précipitations mensuelles.

Dans le Grand Yaéré, Il pleut très rarement de novembre à mars. En mars-avril, la région est très souvent arrosée par des averses très faibles de courte durée. Pour la plupart des stations, les coéfficients de variation pour les mois de mars à mai ainsi qu'octobre sont proches ou dépassent parfois 100% (tableau 2.2); ce qui rend hypothétique la venue des pluies pendant cette période de l'année.

Les grandes averses s'établissent entre le mois de juin et le mois de septembre. La distribution des précipitations mensuelles est unimodale. Plus de 50% des pluies tombent en juillet-août (figure 2.4). Dès septembre-octobre, on note une forte baisse des précipitations due au recul du F.I.T. vers le Sud.

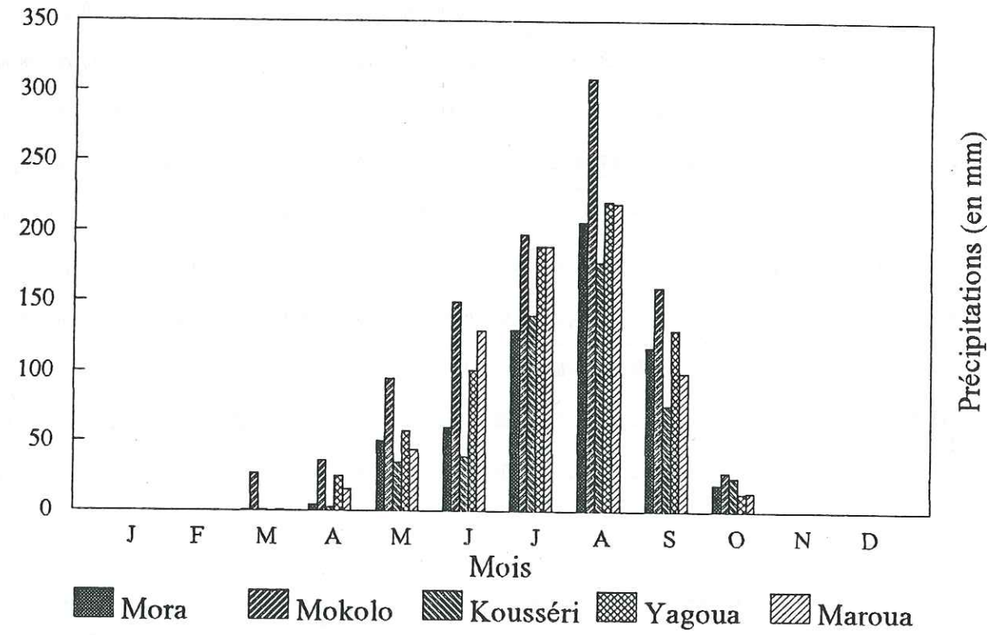


Figure 2.4. Histogramme de distribution des précipitations moyennes mensuelles sur les principales stations du Grand Yaéré (1985-1991).

2.3.3. Les autres paramètres climatiques.

2.3.3.1. La température.

Les valeurs moyennes annuelles oscillent généralement entre 28°C et 29°C. Toutefois, pour une même année, on a des températures de l'ordre de 22°C à 34°C (tableau 2.3).

Tableau 2.3. Températures moyennes mensuelles sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Localité		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
Maroua	moyenne	25,16	27,33	31,19	33,71	31,61	29,66	23,04	26,81	27,35	29,05	28,34	25,54	28,23
(1985-1991)	écarts-type	1,65	2,08	1,33	2,33	1,30	0,65	9,44	1,28	0,84	1,33	1,06	1,28	0,86
	coef. varia.	0,07	0,08	0,04	0,07	0,04	0,02	0,41	0,05	0,03	0,05	0,04	0,05	0,03
Kousséri	moyenne	23,71	27,19	30,31	33,25	33,09	31,63	28,99	27,47	28,85	29,20	28,37	24,26	28,86
(1985-1991)	écarts-type	1,92	2,00	1,51	0,92	1,99	1,34	1,90	1,40	1,01	1,24	0,86	1,44	1,46
	coef. varia.	0,08	0,07	0,05	0,03	0,06	0,04	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,06	0,05
Mokolo	moyenne	22,78	25,25	27,84	30,85	28,86	26,77	24,51	24,03	24,92	26,26	26,38	23,71	26,01
(1985-1991)	écarts-type	1,75	2,28	1,68	0,60	1,19	0,52	0,68	0,57	0,71	0,66	0,63	1,53	1,07
	coef. varia.	0,08	0,09	0,06	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,06	0,04
Waza	moyenne	24,55	28,30	31,84	33,66	32,22	30,23	27,48	26,26	23,05	24,51	24,50	25,88	27,71
(1985-1991)	écarts-type	1,82	2,17	1,32	0,30	1,47	1,75	1,81	0,94	9,58	10,08	10,25	1,49	3,58
	coef. varia.	0,07	0,08	0,04	0,01	0,05	0,06	0,07	0,04	0,42	0,41	0,42	0,06	0,14

L'histogramme de distribution des températures moyennes mensuelles montre que la répartition est bimodale : l'un des pics se situe à environ 34°C en avril et l'autre à moins de 30°C en octobre (figure 2.5). Les mois de décembre et janvier présentent généralement les températures les plus basses.

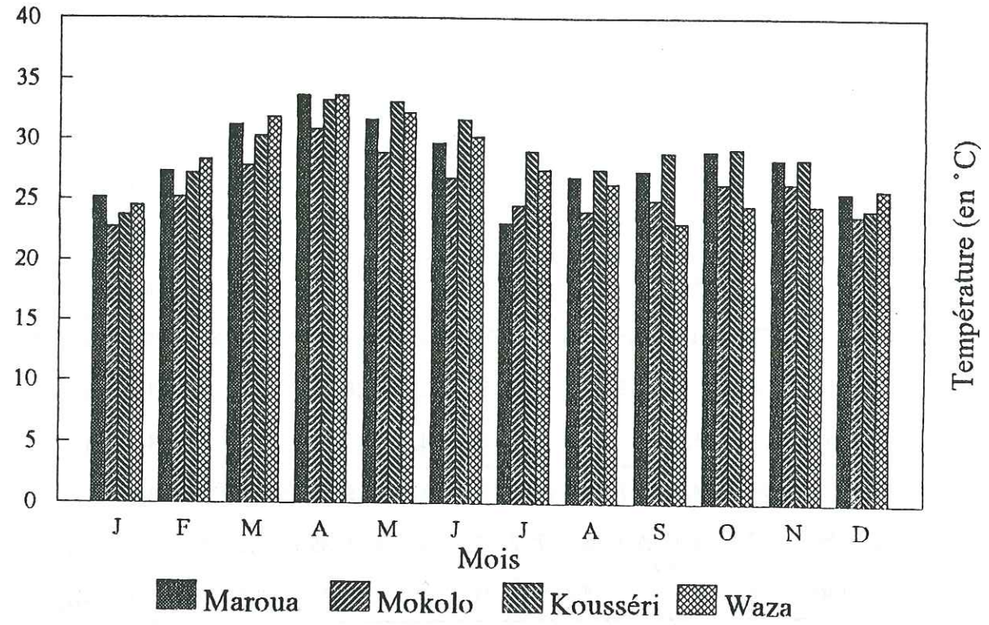


Figure 2.5. Histogramme de distribution des températures moyennes mensuelles sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

2.3.3.2. L'évaporation.

Les valeurs de l'évaporation mesurées sur l'évaporomètre "Piche" augmentent progressivement entre octobre et mars, puis diminuent d'avril jusqu'en septembre (tableau 2.4 et figure 2.6).

D'octobre à mars, la zone de convergence intertropicale (Z.C.I.T.) se déplace vers le Sud (cf. figure 2.1) et le Grand Yaéré est balayé par des vents secs du NE qui diminuent l'humidité relative et renforcent les températures et par conséquent l'évaporation.

Tableau 2.4. Evaporation "Piche" moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1987-1991).

Localité		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne	total
Maroua	moyenne	302,7	275,2	373,1	346,0	256,3	154,8	110,3	67,1	106,3	189,7	270,1	254,7	227,3	2684,4
(1987-1991)	écarts-type	71,6	17,5	27,5	41,4	83,7	29,0	16,0	9,5	45,3	21,9	6,7	17,4	10,9	188,9
	coef. variat.	20,7	6,7	6,2	12,8	30,0	20,0	10,0	10,0	41,7	10,0	0,0	7,7	0,0	10,0
Mokolo	moyenne	441,4	484,7	586,2	515,4	291,5	182,3	116,4	76,7	104,9	249,2	391,0	415,8	329,6	3875,9
(1987-1991)	écarts-type	16,4	29,5	40,0	99,8	157,1	23,4	20,4	8,6	9,8	34,0	5,5	32,0	24,7	364,1
	coef. variat.	3,4	5,7	8,3	16,8	50,0	13,4	15,3	13,1	12,1	10,0	2,3	6,6	13,2	10,0
Kousséri	moyenne	371,8	361,3	513,6	479,3	377,3	289,9	180,4	87,8	181,7	295,0	369,3	300,2	328,7	3944,4
(1987-1991)	écarts-type	22,1	71,3	50,8	37,0	76,9	58,5	60,1	36,8	75,8	39,0	33,8	71,6	27,3	327,1
	coef. variat.	5,4	19,4	9,4	8,1	20,3	20,9	31,2	38,3	44,9	12,1	8,8	24,2	10,0	10,0
Yagoua	moyenne	264,3	294,3	368,7	334,3	257,0	168,6	84,6	65,3	106,5	135,7	232,5	303,1	217,9	2614,8
(1987-1991)	écarts-type	22,3	28,7	23,0	30,0	76,2	29,3	9,4	10,3	45,7	27,0	19,1	111,1	36,0	432,2
	coef. variat.	8,4	9,8	6,3	9,0	29,6	17,4	11,1	15,7	42,9	19,9	8,2	36,7	17,9	215,0

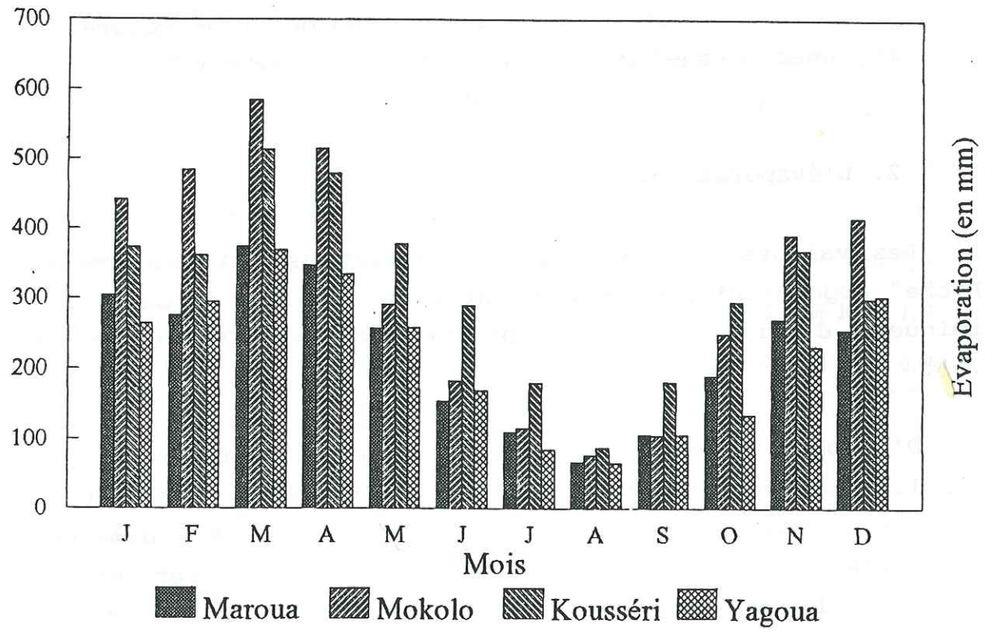


Figure 2.6. Histogramme de distribution de l'évaporation moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1987-1991).

L'évaporomètre "Piche" exprime le pouvoir évaporant de l'atmosphère sur des surfaces d'eau libre. Or ce qui nous intéresse le plus, c'est de savoir ce qui se passe à la surface libre des nappes souterraines. Nous aborderons cet aspect dans le chapitre réservé aux isotopes de l'eau.

2.3.3.3. L'humidité relative.

L'humidité relative est le rapport entre le poids de la vapeur d'eau que contient l'air et celui qu'il contiendrait s'il était saturé à la température du moment et pour une pression donnée.

La comparaison de la figure 2.5 et de la figure 2.7 montre que, l'humidité relative varie de façon remarquable en fonction de la température. La diminution de température qui résulte de la baisse de pression avec l'altitude (phénomène adiabatique) engendre l'augmentation de l'humidité relative. Elle diminue d'octobre à février-mars (figure 2.7).

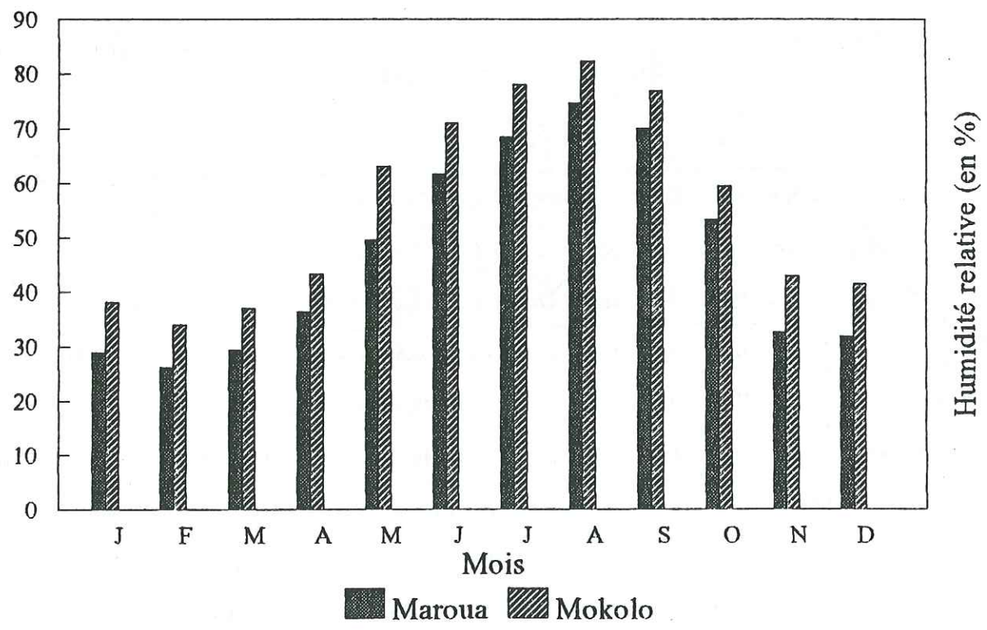


Figure 2.7. Histogramme de distribution de l'humidité relative moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

A partir de mars, les vents du Sud-Ouest commencent à se faire sentir par une augmentation progressive de l'humidité relative jusqu'en août. Les valeurs limites sont d'environ 83% en août, à Mokolo et de 26% en février, à Maroua (tableau 2.5).

Tableau 2.5. Humidités relatives moyennes mensuelles sur les stations de Maroua-Salak et de Mokolo (1985-1991).

Localité		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne	total
Maroua	moyenne	28,86	26,14	29,29	36,29	49,43	61,57	68,50	74,71	70,00	53,29	32,43	31,71	46,62	552,43
1985-1991	écarts-type	3,91	4,73	6,69	6,69	9,69	3,77	7,87	2,43	1,60	4,27	3,37	2,81	2,05	21,66
	coef. variat	14,00	18,00	23,00	18,00	20,00	5,85	11,00	3,00	2,00	8,00	10,00	9,00	4,14	3,76
Mokolo	moyenne	38,00	33,86	37,00	43,14	63,14	71,00	78,00	82,29	76,86	59,43	42,86	41,43	55,58	667,00
1985-1991	écarts-type	3,85	6,31	9,44	3,23	8,64	3,46	2,83	4,03	3,64	9,07	6,15	5,60	5,52	66,26
	coef. variat	10,14	18,64	25,52	7,48	13,69	4,88	3,63	4,89	4,74	15,26	14,35	13,52	11,40	136,74

2.3.3.4. L'insolation.

Tableau 2.6. Insolation moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1988-1991).

Localité		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne	total
Maroua	moyenne	285,38	289,73	280,20	258,95	234,30	228,63	184,00	188,58	216,15	267,15	293,35	275,75	251,40	2956,15
1988-1991	écarts-type	13,62	40,29	17,23	32,16	40,10	4,80	10,05	15,88	14,04	6,09	19,53	14,83	6,65	174,35
	coef. variat	5,00	14,00	6,00	12,00	17,00	2,00	5,00	8,00	6,00	2,00	7,00	5,00	3,00	6,00
Mokolo	moyenne	295,73	272,85	287,95	242,83	210,98	178,35	101,53	177,78	201,20	254,95	287,85	283,43	232,93	2795,20
1988-1991	écarts-type	7,48	10,04	17,71	37,44	22,85	19,35	49,98	30,97	22,77	40,52	11,36	9,41	3,08	36,99
	coef. variat	3,00	4,00	6,00	15,00	11,43	11,00	49,00	17,18	11,00	16,00	4,00	3,00	1,00	1,00
Kousséri	moyenne	284,53	253,53	250,88	274,63	238,80	228,83	155,70	181,43	213,88	283,60	285,77	275,88	242,97	2855,98
1988-1991	écarts-type	15,93	31,82	33,85	28,30	30,16	33,89	12,93	29,11	22,70	14,36	23,54	12,71	8,83	168,31
	coef. variat	6,12	13,00	13,00	10,00	13,00	15,00	8,00	16,00	11,00	5,00	8,00	5,00	4,00	6,00
Waza	moyenne	301,20	278,40	276,98	256,90	236,58	232,25	222,63	186,98	202,60	266,13	277,03	297,33	252,92	3034,99
1988-1991	écarts-type	7,49	7,51	25,08	32,15	31,06	16,73	39,75	22,14	10,75	36,70	7,81	12,94	20,84	250,12
	coef. variat	2,49	2,70	9,06	12,52	13,13	7,20	17,85	11,84	5,31	13,79	2,82	4,35	8,59	103,05

L'insolation est exprimée par un total mensuel en heures (tableau 2.6). Elle varie suivant la latitude de la station considérée. Elle est très variable en saison des pluies où l'on a les mois les moins ensoleillés (figure 2.8).

La saison des pluies s'accompagne d'une augmentation de l'humidité relative qui a pour effet de réduire, au niveau du sol, le rayonnement solaire global. L'évaporation évolue quelque peu avec l'insolation. Plus l'air est sec, plus importante est la quantité d'énergie solaire qui parvient au sol.

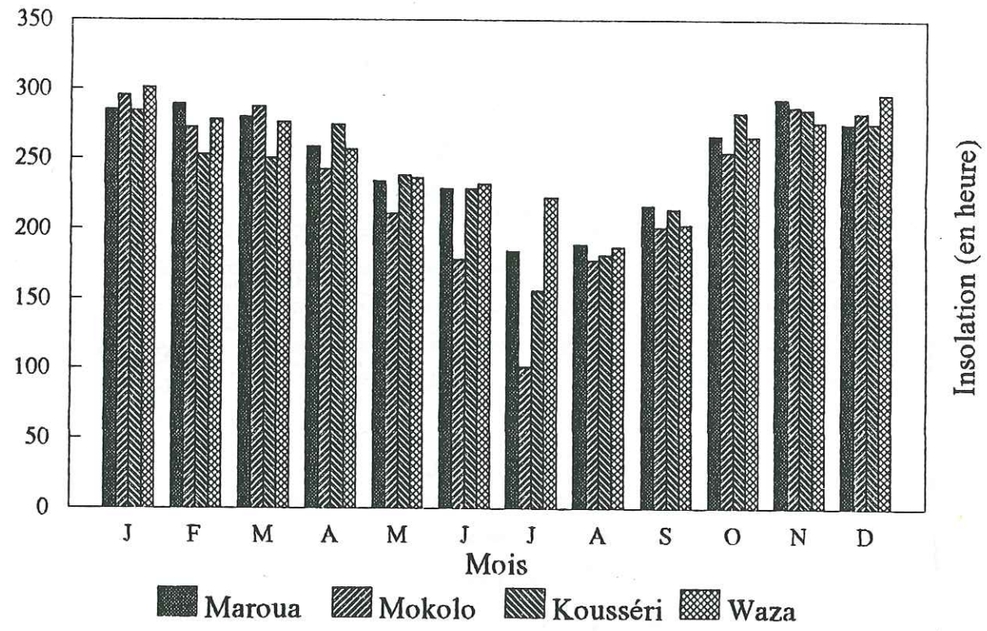


Figure 2.8. Histogramme de distribution de l'insolation moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1988-1991).

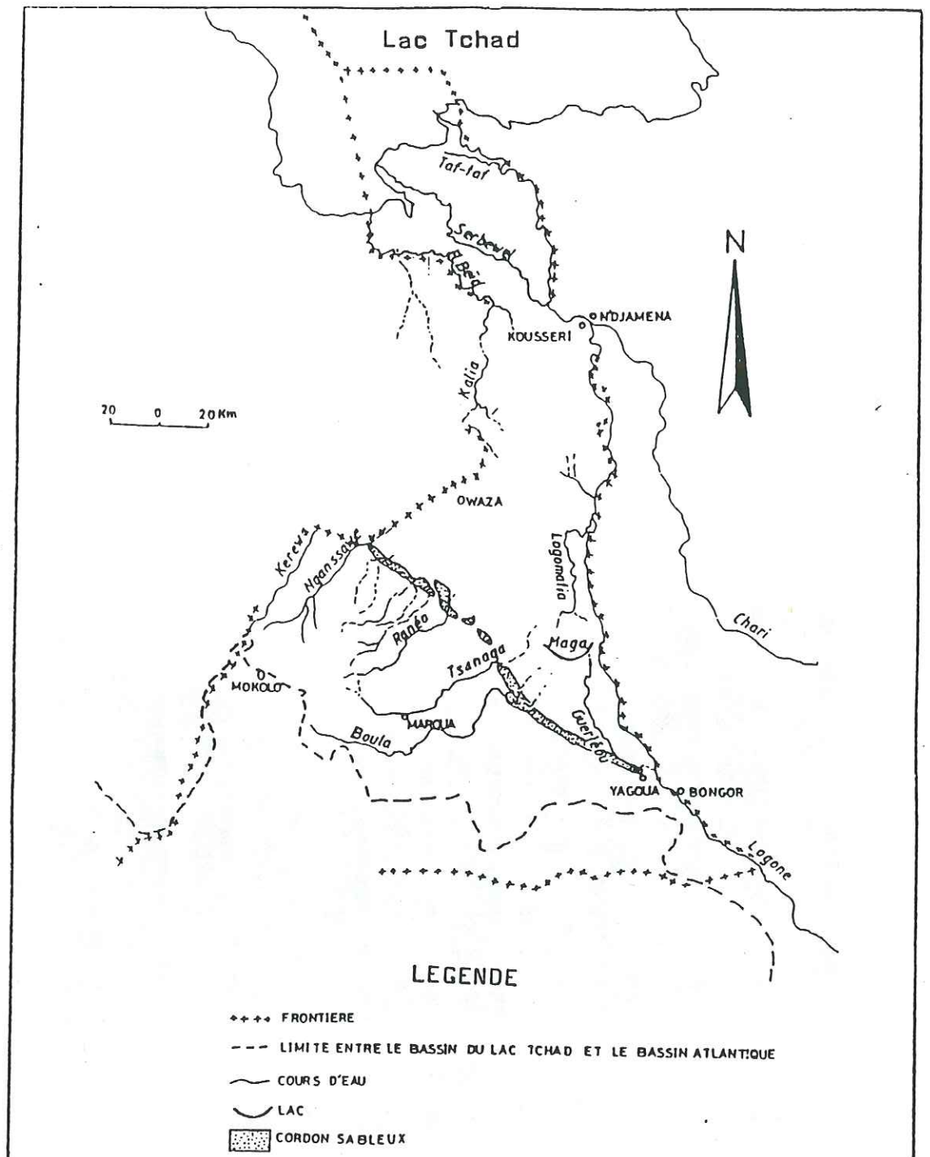


Figure 2.9. - Esquisse hydrographique de l'Extrême-Nord du Cameroun.

2.4. Le réseau hydrographique et le régime des eaux de surface.

2.4.1. Généralités.

Les travaux de l'O.R.S.T.O.M. sur les bassins du Chari et du Logone ainsi que ceux du C.R.H./I.R.G.M. ont permis de préciser les grandes lignes de l'hydrologie de surface du bassin tchadien en général et du Grand Yaéré en particulier.

Dans le Yaéré, l'absence de pente entrave la formation d'un réseau hydrographique hierarchisé et d'un écoulement fluvial normal. On y observe selon **Touchebeuf** (1969 in **Naah**, 1990) de nombreux petits bras sinueux, mal calibrés et enchevêtrés qui canalisent plus ou moins bien l'écoulement et s'estompent souvent avant d'avoir rejoint un affluent plus important.

Le réseau hydrographique du Grand Yaéré (figure 2.9) trouve son origine dans deux régions montagneuses; les Monts Mandara d'où partent les mayos et le plateau de l'Adamaoua, "château d'eau du Cameroun" où le Logone prend sa source. Une partie des eaux issues de ces deux systèmes sont reprises par un système de drain, l'El Beïd, qui assure le transfert vers le lac Tchad.

2.4.2. Les rivières saisonnières ou "mayos".

Le terme "mayo" est une expression foulbé qui désigne le cours d'eau. Les mayos, équivalents des oueds des régions arides au Sahara, sont caractérisés par un régime de type sahélien (subordonné aux régimes pluviométriques). Ils ont un réseau hydrographique très dégradé et aréique. On assiste à un amoindrissement rapide de leurs débits des Monts Mandara d'où ils proviennent vers le cordon sableux et la plaine des Yaérés où ils perdent leurs eaux sans jamais atteindre le Logone.

Pendant la saison des pluies où les mayos sont en eau, le ruissellement est intense en zone de montagne où les mayos coulent à travers les rochers. Les cours moyens des mayos correspondent à une première régulation des divers débits de crues provenant de la montagne. Les cours inférieurs présentent des pentes inférieures à 2/1000. Ces faibles pentes et la lenteur de l'écoulement qui en résulte à ce niveau, entraînent des débordements très fréquents et provoquent parfois des changements de cours.

Les mayos sont caractérisés par un écoulement nul de novembre à mai; écoulement intermittent de crues isolées en mai et juin (car les pluies de ces mois ne participent pas ou très peu à l'écoulement parce qu'absorbées rapidement par un sol complètement désséché par 6 à 7 mois d'aridité); écoulement permanent de juillet à septembre puis tarissement à partir d'octobre. Les mayos et leurs affluents ont des tracés liés au réseau de fractures; les directions (SW-NE, WSW-ENE, NS) coïncident avec celles qui ont été définies dans le socle. Les plus importants de ces mayos drainent un bassin versant de l'ordre de 7000 km² (tableau 2.7).

Tableau 2.7. Caractéristiques morphologiques et hydrologiques des principaux mayos du Grand Yaéré.

Mayo	Source	Bassin d'alimentation (km2)	Extension latérale (m)	Puissance des alluvions (m)	Passage sur le cordon
Kerawa	Nord de Mokolo	500 ?	<1000	<25	frontière
Kolofata	Pénéplaine de Koza	75	très faible	10 à 20	frontière
Ngansawe	Pénéplaine de Koza	1035	<400	<25	Limani
Sava	Montagne de Mora	70	faible	20 à 25	Magdemé
Mangafé	Chaîne de Meri	268	faible	<20	Kilissawa
Ranéo	Massif de Douvangar	435	faible	10 à 40	Petté
Motorsolo	Nord de Maroua	877	inconnue	inconnue	Fadaré
Tsanaga	Nord de Mokolo	1535	<2000	10 à 40	Guingley
Boula	Monts Mandara	1517	inconnue	inconnue	Dargala
Balda	Plaine de piémont	240	très faible	<10	Balda

Cas du Mayo Tsanaga.

L'allure de son réseau hydrographique, la taille de son bassin versant, sa position dans le contexte morphologique, les études disponibles ... sont autant de critères qui ont motivé le choix du Mayo Tsanaga comme exemple type de cours d'eau saisonnier. Son bassin versant couvre une superficie de 1535 km² entre 10°30' et 10°53' de latitude Nord, 13°42' et 14°36' de longitude Est (figure 2.10).

Les caractéristiques physiques propres aux différents secteurs des bassins versants telles que la topographie, la morphologie, la géologie ainsi que leur superficie, entrainent des variations spatiales de l'écoulement. Le bassin Tsanaga peut être ainsi divisé en trois domaines distincts :

- le bassin supérieur situé entre Mokolo et Gazawa où existent d'énormes seuils rocheux susceptibles de perturber l'écoulement de surface;

- le bassin moyen entre Gazawa et Maroua; il s'agit d'un bief rectiligne présentant un lit sableux. Il constitue la portion la plus importante (en extension et en profondeur) de la nappe sous-fluviale du Mayo Tsanaga;

- le bassin inférieur, compris entre Maroua et Bogo; il présente un paysage plat et monotone.

Le Mayo Tsanaga représente le principal cours d'eau de ce bassin. Il prend sa source dans les Monts Matakam dont le point culminant; Hosséré Ziver est à une altitude de 1436 m au nord de Mokolo. C'est son cours inférieur (compris entre Maroua et Bogo) qui nous intéresse au premier plan. A Maroua, le Tsanaga reçoit en rive gauche le Kalliao, son principal affluent issu du Sud du massif de Méri et en rive droite le Mizao. Les données hydrologiques disponibles montrent qu'il existe des différences de débit entre Maroua et Bogo. Cette

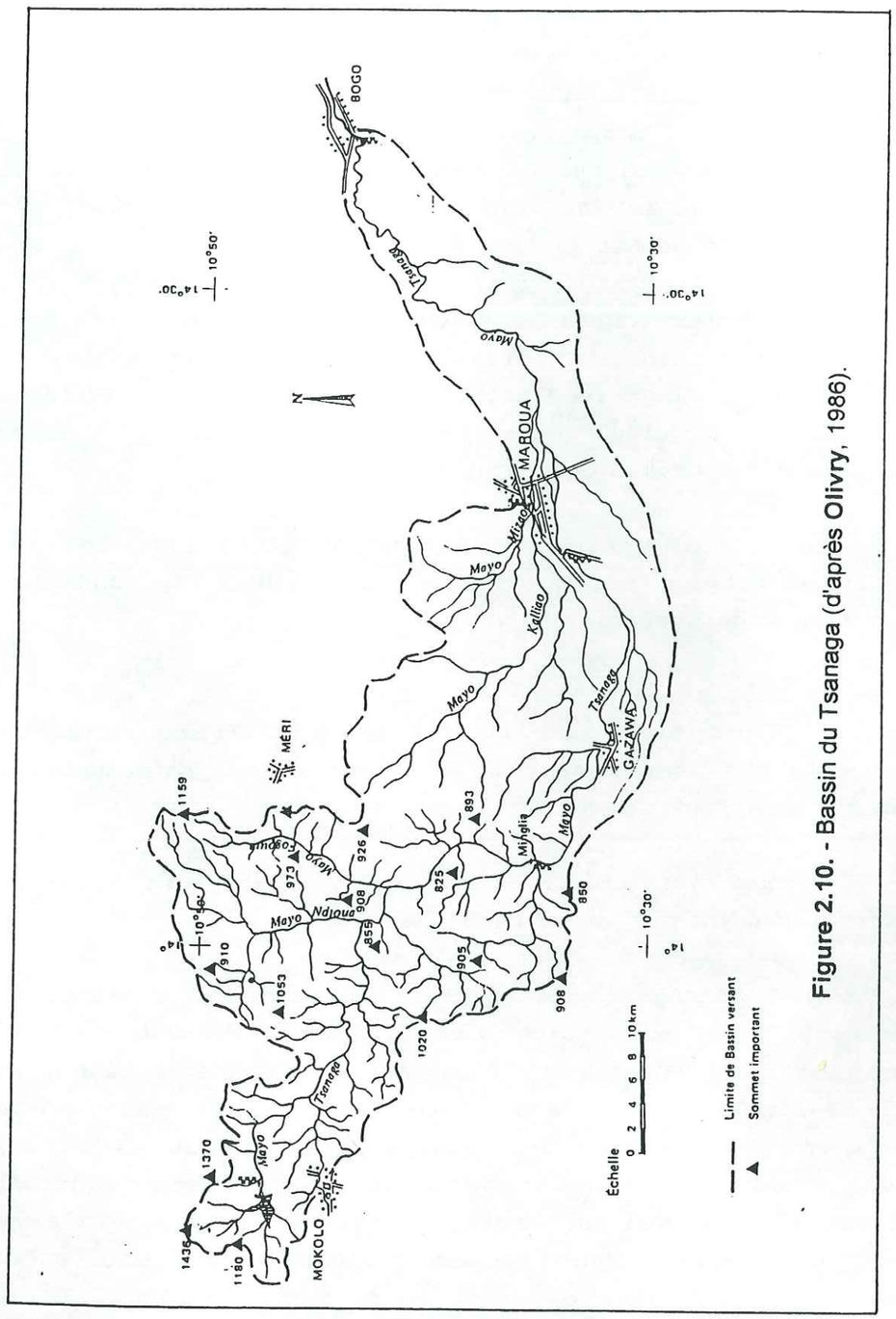


Figure 2.10. - Bassin du Tsanaga (d'après Olivry, 1986).

différence peut s'expliquer non seulement par une diminution de la pluviométrie entre les deux stations, mais également par des pertes par évaporation et par infiltration vers les aquifères.

2.4.3. Le Logone inférieur.

Long d'environ 1000 km, le Logone prend sa source dans le plateau de l'Adamaoua à une cote voisine de 1200 m, bordée au Nord et à l'Est par des reliefs à 1400 m. Morphologiquement, son cours est scindé en trois : de la source jusqu'à Laï, le Logone supérieur, de Laï à Bongor le Logone moyen et de Bongor jusqu'à sa confluence avec le Chari à Kousséri, le Logone inférieur qui intéresse notre secteur d'étude.

A Bongor, le Logone draine un bassin versant de 7400 km². A Yagoua, le Mayo Danay rejoint le Logone. Entre Yagoua et Logone-Birni, le Logone inférieur perd ses eaux sur sa rive gauche en direction de la plaine des Yaérés par les Mayos Guerléou et Logomatia.

Le Guerléou prend naissance au nord de Yagoua et le Logomatia entre Pouss et Tékélé. Ces deux cours d'eau suivent un cours parallèle au Logone. Dans la région de Maga, le cours du Guerléou est interrompu par une retenue artificielle de 36000 ha (figure 2.11) tandis que des ouvrages de vidange (Mayo Vrik) de cette retenue permettent de maîtriser le niveau de celle-ci et d'accroître le niveau du Logomatia. Le Logomatia grandi par le trop plein de la retenue, rejoint le Logone par un coude brusque de Ngodeni à Ivié.

La retenue de Maga et la digue de Tékélé (qui longe le Logone de Pouss à l'aval de Gamsaï) assurent le stockage des eaux de débordement en périodes de fortes crues en vue des aménagements rizicoles (SEMRY II...) de la plaine des Yaérés. Les aménagements remettent en cause les axes de pénétration des eaux dans la plaine. Cependant, ces axes ont été reportés à l'aval des endiguements dans le secteur Gamseï-Logone Gana.

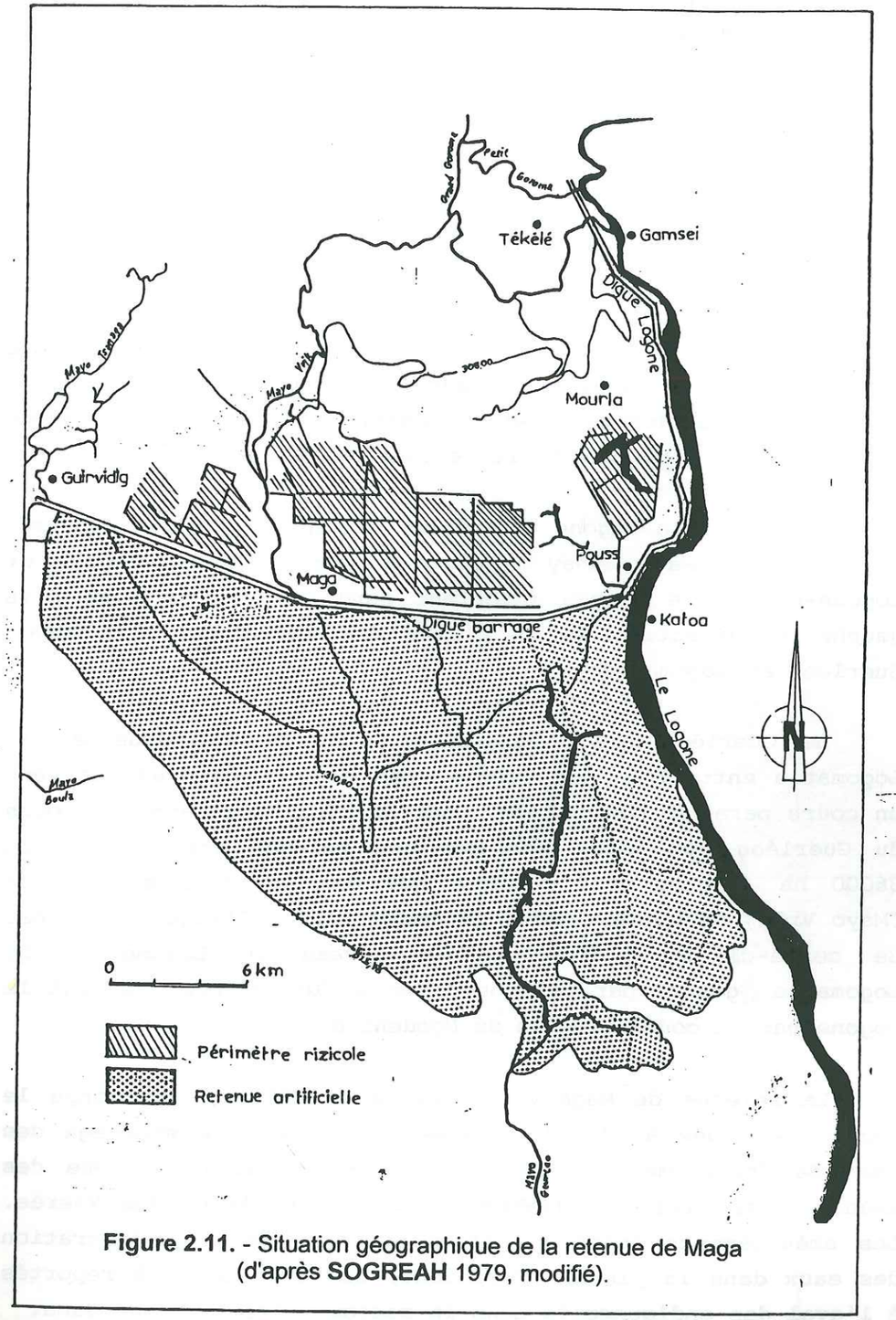


Figure 2.11. - Situation géographique de la retenue de Maga (d'après **SOGREAH** 1979, modifié).

A Bongor, sur la période de 1948 à 1973, le module était de 534 m^3/s. A Logone-Birni, ce module n'est plus que de 380 m^3/s, ce qui implique une perte de 154 m^3/s. Les étiages absolus surviennent généralement en avril. La valeur moyenne est de 42,4 m^3/s. Les maxima de crues sont généralement observés en septembre ou en octobre avec des valeurs moyennes de 2017 m^3/s.

Le seuil de débordement du Logone est atteint pour des débits supérieurs à 1100 m3/s au passage de Bongor-Yagoua. Lorsque les débits sont très faibles comme ce fut le cas lors des cycles 1972/73 ou 1973/74, la crue n'engendre aucun débordement vers les plaines avoisinantes. Le maintien de la totalité des volumes d'eau entre les berges des grands axes de drainage isole les plaines d'inondation et peut avoir (**Gac**, 1980) en permettant à l'évaporation de s'exercer pendant deux années consécutives, des incidences considérables sur le bilan chimique de la crue suivante.

D'après **Olivry** (1986), pour des débits maxima de 1100 m^3/s à Bongor, l'inondation se limite à un large drain au nord en continuité du Logomatia. Jusqu'à 1200 m^3/s à Bongor, les eaux de crue envahissent la totalité du lit du Logomatia, les dépressions et les drains artificiels creusés. Pour des débits supérieur à 1500 m^3/s à Bongor, le Yaéré est fortement inondé et le flot de crue atteint l'El Beïd.

2.4.4. L'EL Beïd.

L'El Beïd se singularise dans le système hydrologique du Grand Yaéré par un réseau hydrographique tout a fait particulier; son régime hydrologique est constitué par les eaux de pluie et les apports des mayos (de juillet à octobre) grandis par les déversements du Logone (d'octobre à novembre), restitués par les Yaérés. L'El Beïd constitue la frontière du Cameroun avec le Nigéria. Son principal affluent, la Kalia, est formé de deux branches : la Kouloum Douma (ou Dioua) et la

Koutelaha Dourma qui prennent leur source à la parallèle 11°30' de latitude Nord. Le cours proprement dit de l'El Beïd n'est visible qu'à quelques kilomètres de Tildé.

Entre janvier et avril, les eaux de L'El Beïd parviennent au lac Tchad à Meinari. Au delà de cette période, l'El Beïd n'est pratiquement plus en eau et son lit est réduit à un alignement discontinu de mares. L'analyse statistique des modules (**Olivry**, 1986) sur la période 1953/54 à 1973/74 (1972/73 et 1973/74 ayant des modules nuls) a conduit aux résultats suivants : valeur médiane 38,9 m^3/s; écart-type 26,4 m^3/s et coefficient de variation 0,679. Les eaux drainées par l'El Beïd constituent un paramètre non négligeable du bilan des eaux de surface.

2.5. Les caractéristiques du bilan hydrologique.

Alors que dans un bassin versant, l'effet de pente va privilégier le ruissellement, dans le Yaéré, l'absence de pente et la nature des sols essentiellement argileux vont plutôt favoriser les processus d'accumulation naturelle des eaux. Du fait de la platitude du relief, les cuvettes des cours d'eau sont difficilement individualisables.

Malgré les difficultés liées à la définition du bassin versant du Yaéré, les principes généraux de fonctionnement hydrologique de cette région sont connus grâce aux travaux de **Billon** et al (1974), **Gac** (1980), **Benech** et al (1982), **Olivry** (1986), **Naah** (1990). Le Yaéré est caractérisé par le mécanisme de fonctionnement suivant :

- de mai à septembre, les précipitations participent essentiellement au remplissage des mares, des cuvettes et à la saturation des sols à un pourcentage de près de 60 % des apports totaux reçus par le Yaéré;

- une première inondation sous la forme de minces filets en provenance des tributaires des Mandara (cf. tableau 2.7),

apparait en année de fort potentiel hydrique, en août. Le total des apports d'eau dus mayos du Mandara (A_M) exprimés en mm, serait de $0,95*10^9$ m^3 (figure 2.12);

- le débordement du Logone (l'essentiel des pertes étant situé entre Bongor et Logone-Birni) provoque la saturation du Yaéré. Il débute dans la deuxième quinzaine de septembre et peut se prolonger jusqu'en octobre. La plaine se transforme alors en un véritable lac de 0,70 à 1 mètre de profondeur sur une superficie d'environ 8000 km^2. Les pertes globales du Logone entre Bongor et Logone-Birni notées, (P_L), sont estimées à $3,64*10^9$ m^3.

En somme, les apports ou entrées en eau, (L_T), exprimés par la relation :

$$L_T = P_Y + A_M + P_L \qquad (2.1)$$

sont à la fois fonction des précipitations directes (apports intérieurs), des écoulements des mayos et du Logone inférieur (apports extérieurs). Les pertes sont assurées essentiellement par l'évapotranspiration et l'El Beïd.

D'après **Naah** (1990), les précipitations directes (exprimées en mm) sur le bassin du Yaéré (P_Y) s'obtiennent à partir d'une étude statistique des précipitations enregistrées aux stations de Maroua et de N'Djamena par la relation :

$$P_Y = 0,461[P_{(Maroua)}+P_{(N'Djamena)}]+11,42 \qquad (2.2)$$

Les apports d'eau des Mayos sont obtenus par :

$$A_M = 1,489(A_M.Bogo) + 2,65 \qquad (2.3)$$

La lame écoulée par l'El Beïd, (He), est liée à l'apport global par l'expression :

$$He = 0,134/(L_T-125) \qquad (2.4)$$

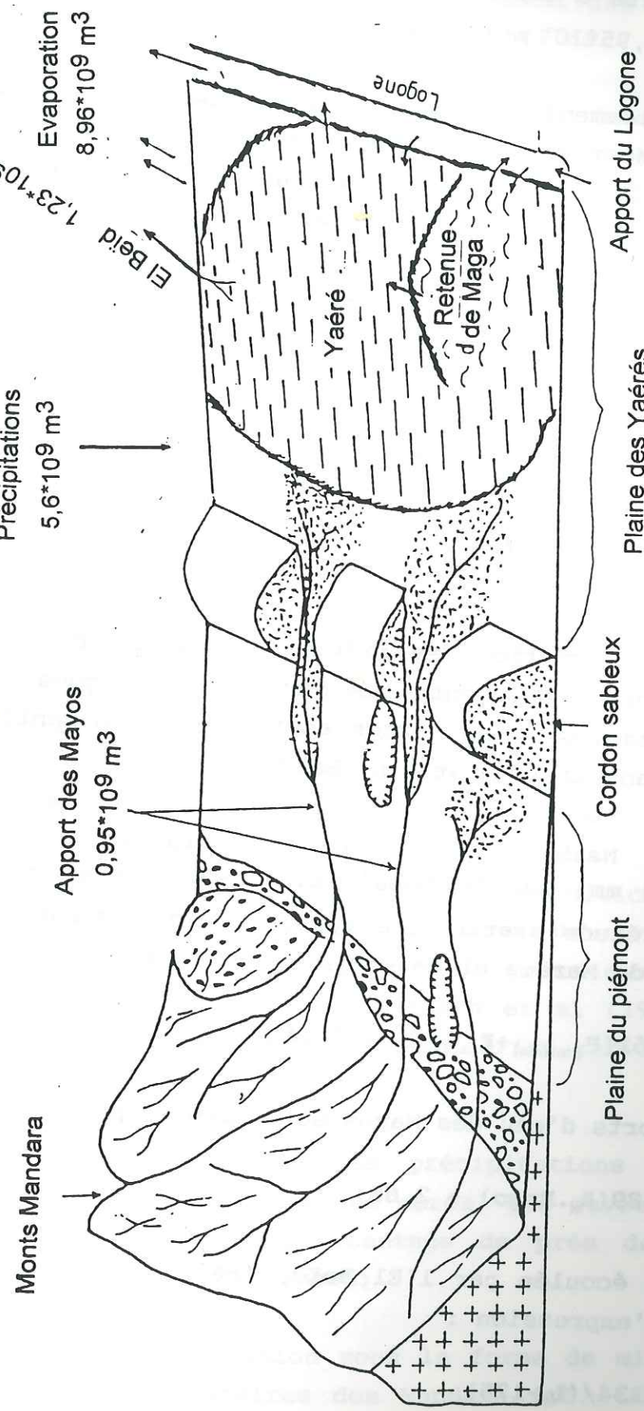


Figure 2.12. - Schéma de mécanisme de fonctionnement hydrologique du Grand Yaéré (Schéma de **Naah**, 1990, complété par les données de **Olivry**, 1986)

Le déficit d'écoulement (**De**) est égal à l'évapotranspiration réelle (**Er**) :

$$De = [Er + (R_1 - R_0)]; \quad avec \quad R_1 - R_0 = 0, \qquad (2.5)$$

R, représente le ruissellement; les indices 0 et 1 désignent respectivement l'entrée et la sortie du système.

A partir des relations (2.4 et 2.5), **Naah** (1990) estime qu'en année moyenne, une lame d'eau totale de 1300 mm dans le Yaéré, produirait dans l'El Beïd à Tildé, un module de l'ordre de 17 m^3/s et fournirait une évapotranspiration réelle dont la valeur moyenne avoisine 1250 mm.

A la suite de cette synthèse sur le principe de fonctionnement hydrologique du Grand Yaéré, nous remarquons que **les échanges entre les nappes et les eaux d'inondation ont été complètement négligés par Olivry** (1986) **et Naah** (1990). **Ces auteurs donnent dans leurs calculs du Bilan, la prépondérance aux mouvements verticaux.** L'étude hydrodynamique et géochimique des eaux souterraines suggère, comme nous le verrons dans la deuxième partie de ce travail, qu'il existe des apports aux nappes à partir des eaux de surface.

2.6. Conclusion.

Les caractéristiques climatiques du Grand Yaéré sont liées à sa continentalité et à l'absence de reliefs marqués pouvant perturber le déplacement du FIT qui conditionne le régime des précipitations.

L'action directe de la pluie sur les nappes est difficile à apprécier parce qu'elle se confond avec d'autres mécanismes, en particulier les mouvements de l'eau dans les cours d'eau (mayos), qui sont essentiellement provoqués par les précipitations.

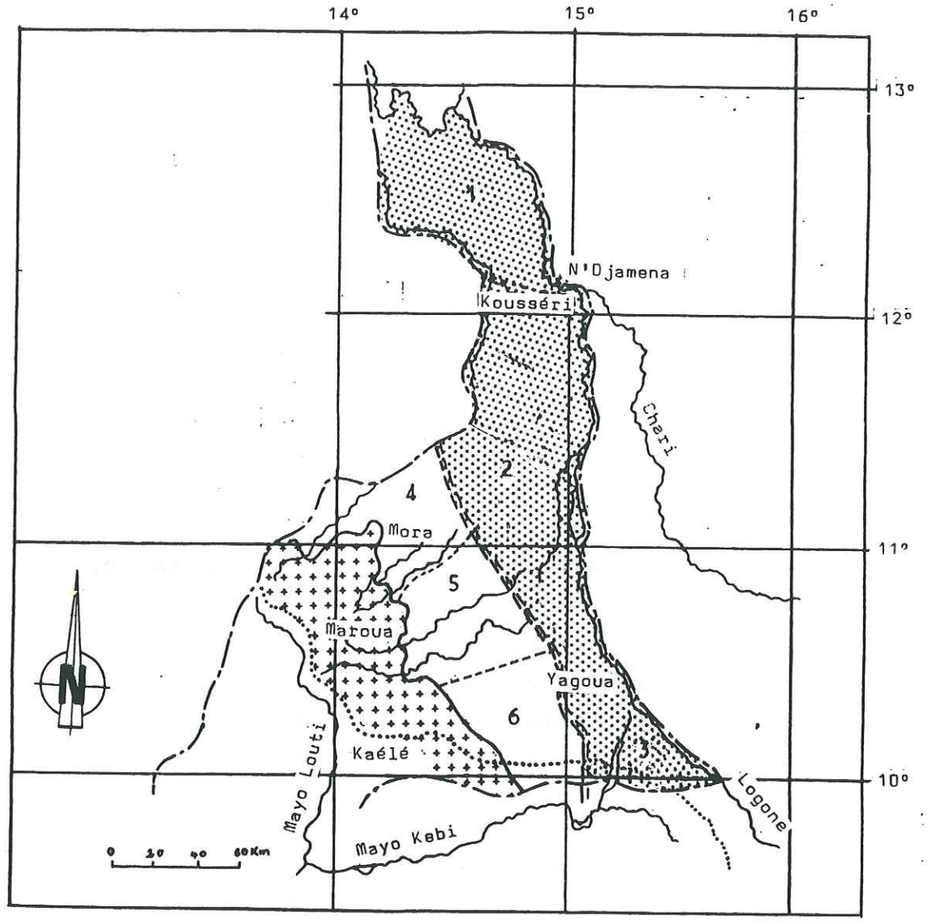
Chapitre 3. CARACTERES GENERAUX DES AQUIFERES.

3.1. Introduction.

3.2. Résultats des travaux antérieurs.

3.3. Description des principales nappes.

3.4. Conclusion.



LEGENDE

Nappe du Chari-Tchad	1	Zone de socle	
Nappe du Logone s. str.	2	Quaternaire : domaine de piémont	
Nappe du "Bec de Canard"	3	Quaternaire : domaine du Logone et Chari	
Plaine de Mora	4	Ligne de jonction des eaux souterraine des deux domaines	-----
Nappe du Nord-Diamaré	5	Limite des bassins tchadien et atlantique	.....
Plaine de Kar-Hay	6		

Figure 3.1. - Les grandes unités hydrogéologiques de l'Extrême-Nord du Cameroun (d'après **Tillement**, 1970; **Detay**, 1987).

3.1. Introduction.

Ce chapitre est une synthèse des connaissances actuelles sur les données hydrogéologiques de base nécessaires à la mise en place d'une politique de développement des ressources en eaux souterraine à l'échelle régionale. Il fait suite à de nombreux travaux réalisés antérieurement dans la région et dont nous avons déjà eu à amorcer la synthèse (**Ngounou Ngatcha**, 1990).

3.2. Résultats des travaux antérieurs.

3.2.1. Travaux de Schwoerer (1965), Lerici (1967), Biscaldi (1970), Tillement (1970), FAO (1971), FORACO (1987).

Dans la partie camerounaise du bassin quaternaire tchadien, **Schwoerer** (1965), **Biscaldi** (1970) et **Tillement** (1970) distinguent les nappes suivantes (figure 3.1) :

* dans le domaine du Logone-Chari-Tchad il existe une nappe généralisée comprenant :

+ la nappe du Chari-Tchad;
+ la nappe du Logone inférieur;
+ la nappe du "Bec de Canard".

* dans le domaine du piémont **Tillement** (1970) distingue trois entités indépendantes liées à des nappes de sous écoulement. Ce sont :

+ la nappe de la plaine de Mora;
+ la nappe de la plaine du Nord Diamaré;
+ la nappe de la plaine de Kar-Hay.

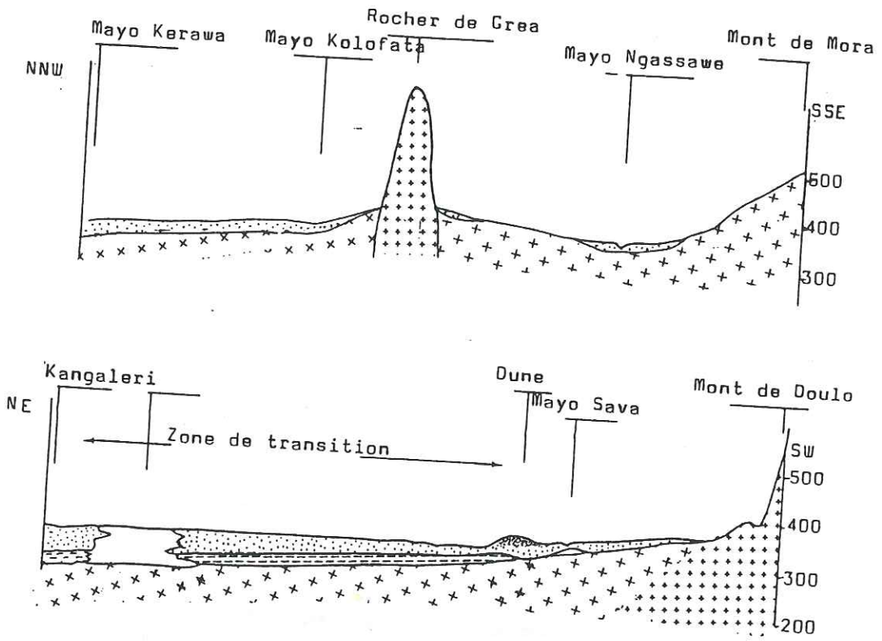


Figure 3.2. - Coupes géologiques à travers la plaine de piémont (d'après **Tillement**, 1970).

A l'exception de ces trois entités, Tillement a considéré la faible extension latérale des nappes de sous écoulement de la zone du piémont comme délimitant de grandes zones stériles dans les interfluves (figure 3.2).

Cette différenciation des nappes du piémont et de celles des Yaérés s'est organisée à partir de considérations d'ordre géomorphologique, géologique et hydrogéologique, puis plus spécifiquement en fonction des axes d'alimentation qui conditionnent la recharge, la pérennité et l'extension des nappes.

En 1967, par analogie à l'artésianisme observé au Nigéria voisin, l'étude de la nappe profonde artésienne de la plaine des Yaérés a été exécutée par le Bureau d'étude LERICI de Milan. Par investigation géophysique, complétée par cinq sondages mécaniques jusqu'au socle, l'artésianisme de la nappe profonde a été testé et prouvé; il se manifeste jusqu'à une limite passant au nord du Parc de Waza.

Grâce aux données complémentaires obtenues par les forages réalisés par la **F.A.O/U.N.D.P.** en 1971 (pour le compte de la Commission du Bassin du Lac Tchad, C.B.L.T.) et ceux exécutés par **FORACO** en 1987 dans le Parc de Waza (pour le compte du Ministère du Tourisme), les anciens auteurs ont distingué dans la plaine des Yaérés : la nappe du Pliocène inférieur et la nappe du Continental terminal (cf. figure 1.7).

3.2.2. Travaux de M. Detay (1987).

Detay (1987) a entrepris l'étude détaillée des différentes unités du Quaternaire à partir des recherches antérieures. Cette étude s'est appuyée sur l'analyse probabiliste des données de forages effectués dans le Nord Cameroun. Après avoir développé les caractéristiques propres à chacune des trois nappes formant le domaine du Logone-Chari-Tchad, l'auteur a abouti aux conclusions suivantes :

- du point de vue de la nature du comblement, celle-ci est au sens large, relativement homogène et les variations latérales de faciès restent locales;

- il apparaît que les neuf dixièmes de la zone recouverte par ces alluvions renferment une nappe généralisée. Elle n'est discontinue qu'en bordure des Monts Mandara où elle est réduite a des nappes de sous-écoulement des "grands Mayos";

- sur le plan analytique et chimique, ces trois unités présentent des caractéristiques très voisines au point que l'on peut les englober dans une seule et même nappe : celle du Logone-Tchad;

- du point de vue probabiliste, la différence de profondeur des forages n'est pas statistiquement significative; il en est de même des écarts de débits spécifiques. Le débit moyen des forages de profondeur semblable dans les nappes du Chari-Tchad et du "Bec de Canard" est sensiblement le double de celui obtenu par les forages dans la nappe du Logone.

La différence de débit observée au sein de la nappe du Logone semble être dûe à un déficit d'alimentation doublé des problèmes de variations latérales de faciès. En effet, **cette unité a la plus vaste superficie et ne possède selon Detay** (1987) **qu'un seul axe d'alimentation : le Logone.** Par ailleurs, la puissance des horizons sableux décroit pour devenir nulle à l'Ouest. C'est également là que l'on rencontre des zones stériles argileuses.

Au nombre de ces observations, l'auteur conclut qu'il ne convient pas de différencier sur le plan hydrogéologique les trois nappes (la nappe du Chari-Tchad, la nappe du Logone inférieur, la nappe du "Bec de Canard"). Leurs caractéristiques hydrodynamiques sont sensiblement les mêmes, fonction de la puissance des horizons sableux, de l'existence

des passées argileuses et de la proximité d'un axe d'alimentation.

Detay (1987) a également étudié le domaine du piémont à partir des différentes unités définies par **Tillement** (1970). Du point de vue probabiliste, l'auteur arrive à des conclusions du même ordre que celles qu'il a formulé pour le domaine du Logone-Tchad : le piémont n'est pas à considérer avec des limites aussi simples que des frontières géomorphologiques qui ne peuvent pas à elles seules rendre compte du comportement de l'hydraulique souterraine.

Grâce à la géophysique (sondage électrique, sismique réfraction), l'on a pu se rendre compte que dans la zone de piémont, il existe des périmètres entiers où il est possible de trouver de l'eau. Ainsi, des secteurs de grande étendue considérés jusqu'alors comme stériles peuvent être aquifères, notamment lors de la présence d'axes d'alimentation en zone de piémont stricto-sensu. Dans cette zone, les axes d'alimentation vont permettre à la tranche altérée du socle d'être aquifère, ce qui aura pour conséquence de diminuer l'extension des secteurs stériles.

A partir d'analyse multicritère, **Detay** (1987) a identifié les caractéristiques de deux entités qui rendent compte de l'hydrodynamique de la zone de piémont : ce sont les formations du recouvrement et les formations du socle au sens large. Par comparaison avec l'aquifère de socle, les formations de couverture représentent un excellent réservoir capacitif surmontant un aquifère de socle, stricto-sensu.

En somme, l'existence possible d'une zone altérée susceptible d'être aquifère a permis de donner une nouvelle dimension au secteur du piémont.

3.2.3. Approche et orientations nouvelles.

En fonction des caractéristiques hydrogéologiques spécifiques à chacune des nappes des terrains du Quaternaire telles que définies par les auteurs anciens, la première chose qui nous est venue à l'esprit était de vérifier par des moyens autres que ceux de **Detay** (1987), la validité des différentes unités sur le plan hydrodynamique.

En nous aidant des récents résultats des campagnes d'hydraulique villageoise, nous avons essayé d'une part de confronter les données nouvelles (89-91) aux données de 1983 à 1986 utilisées par Detay. D'autre part, nous avons réalisé quelques coupes géologiques selon différents axes de la région où les corrélations entre forages étaient possibles. Notre investigation a porté sur les zones où les données antérieures à notre étude étaient trop peu nombreuses et où plusieurs hypothèses étaient envisageables. Une argumentation critique basée sur les observations et les données nouvelles est proposée pour compléter les hypothèses antérieures.

En ce qui concerne les aquifères du Quaternaire, les données disponibles confortent bien certaines hypothèses de **Detay**. Par exemple, dans la région, le mélange des eaux souterraines venant des Monts Mandara avec celles en provenance du Logone, se produit suivant une ligne orientée NNW-SSE dite "ligne de jonction des eaux souterraines" (Cf. figure 3.1). **Cette ligne délimite deux bassins hydrogéologiques : en amont le bassin du piémont et en aval le bassin des Yaérés. Du fait de la diversité des unités hydrogéologiques** (tableau 3.1), **ces deux bassins sont très complexes.**

Pour ce qui concerne les nappes profondes, plusieurs auteurs ont admis l'existence d'une nappe du Pliocène et d'une nappe du Continental terminal. Dans le volet du chapitre consacré à la géologie, nous avons eu à replacer le Continental terminal dans son contexte stratigraphique local.

Compte tenu des conclusions auxquelles nous sommes parvenus, nous regroupons désormais la nappe du Pliocène inférieur et la nappe du Continental terminal au sein d'une même unité appartenant au bassin hydrogéologique des Yaérés et dénommée le système aquifère du Continental terminal.

Tableau 3.1. Classification des nappes du Grand Yaéré (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Epoque géologique	Unités hydrogéologiques	Forme et extension des aquifères	Situation géographique	Nature des aquifères	Perméabilité	Bassin hydrogéologique
Quaternaire	nappe sous-fluviale	continue	lit des mayos	alluvions	bonne	piémont
	système aquifère du piémont	continue	piémont	altérites et alluvions	variable	
	nappe perchée	localisée	piémont et Yaérés	dunes, chenaux sables fossiles	bonne	
	système aquifère des Yaérés	continue	Yaérés	alluvions	moyenne	Yaérés
Tertiaire	Continental terminal	continue	Yaérés	sables, grés sable argileux	?	
Tertiaire et Précambrien	nappes du socle	discontinue et localisée	piémont?	fracture	bonne	piémont?
				fissure	faible	

Dans les paragraphes qui vont suivre, et en attendant d'aborder dans le détail, dans la deuxième partie de notre mémoire l'étude du fonctionnement des systèmes aquifères du Quaternaire, nous allons décrire les principales nappes en insistant sur les faits nouveaux.

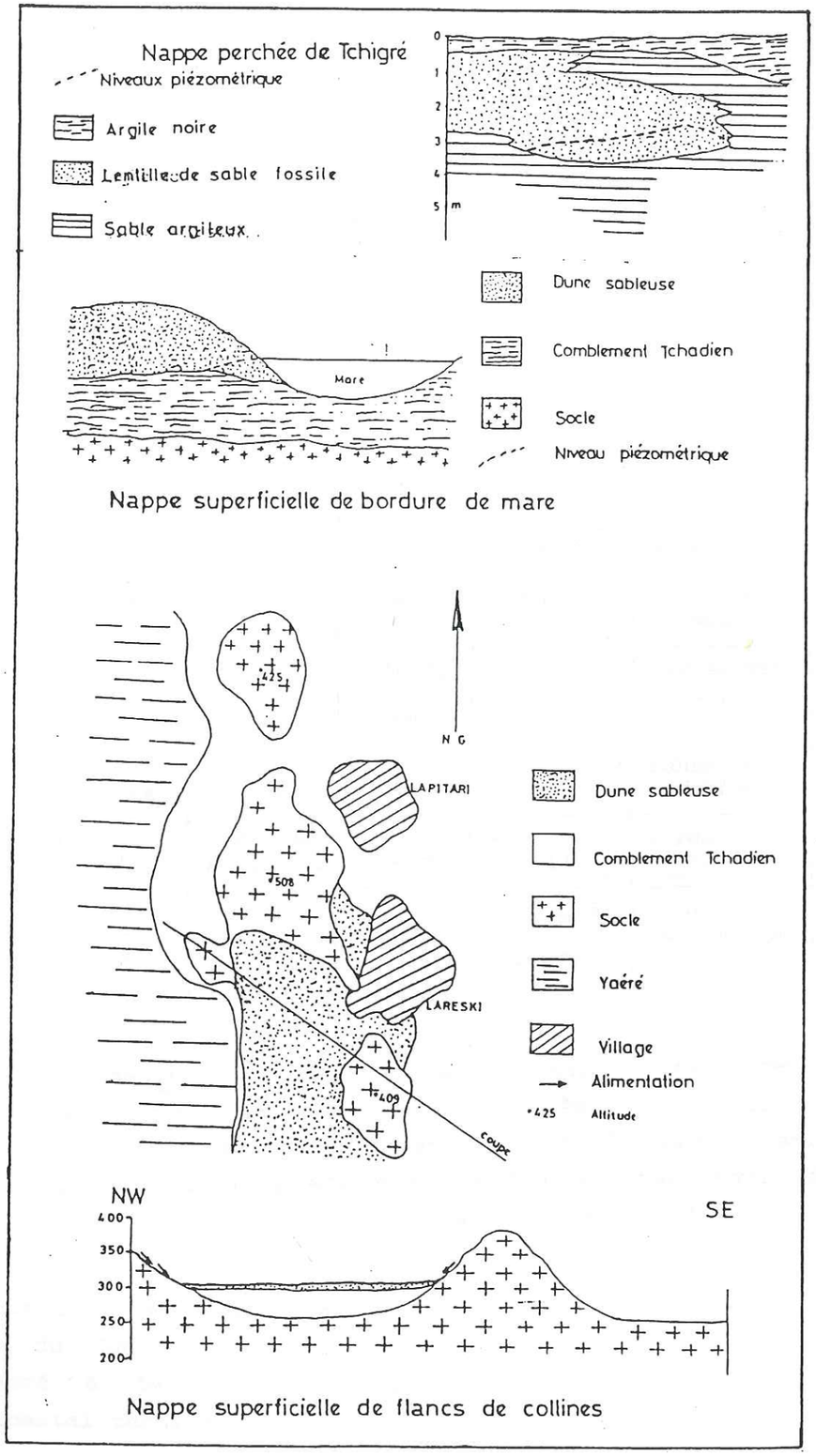


Figure 3.3. - Schéma et Coupe de localisation des nappes perchées dans le Grand Yaéré (**Ngounou Ngatcha B.**, 1990).

3.3. Description des principales nappes.

3.3.1. Le bassin hydrogéologique du piémont.

3.3.1.1. Les nappes superficielles.

Nous désignons par nappes superficielles l'ensemble des aquifères qui se rencontrent à une profondeur variable de -5 à -20 m par rapport à la surface du sol. De telles nappes sont connues dans les deux bassins. On les regroupe dans deux grands types : les nappes perchées et les nappes sous-fluviales.

i) <u>Les nappes perchées</u>.

Elles désignent des nappes isolées, peu étendues et proches de la surface du sol. Ces nappes sont généralement contenues dans les sables dunaires qui jalonnent les mares ou qui entourent les flancs des collines. Elles sont aussi souvent piégées dans des lentilles ou des chenaux fossiles sableux (figure 3.3). Ces dernières offrent les meilleurs débits.

Ce sont des nappes en général temporaires. Leur pouvoir régulateur est extrêmement faible : elles tarissent dès les premiers mois de la saison sèche. Elles sont rarement en relation avec les nappes sous-fluviales.

ii) <u>Les nappes sous-fluviales</u>.

Ce sont des nappes liées à l'écoulement souterrain à la base des alluvions qui comblent les lits des mayos; que ces derniers soient en eau de façon permanente ou temporaire. L'écoulement de l'eau souterraine dans les remplissages alluvionnaires est conforme à celui des eaux de surface, c'est-à-dire qu'il s'opère vers l'aval.

Ces nappes sont très connues sous les termes de "nappes d'inféro-flux" ou "nappes d'underflow" ou "nappes de sous-écoulement". Ces trois expressions assez proches mais moins rigoureuses parce qu' exprimant le débit d'écoulement, ne sont pas très appropriées ou conviennent mal pour désigner ces types de nappes, au contraire de "nappe sous-fluviale" qui désigne en même temps le mouvement de l'eau et caractérise le terrain qui renferme de l'eau.

Elles sont directement rechargées par l'écoulement superficiel des Mayos. La profondeur du niveau de la nappe sous le sol varie en moyenne d'environ 2 mètres. Le niveau des nappes atteint sa plus haute valeur pendant ou peu après la saison pluvieuse et s'abaisse ensuite progressivement pendant le reste de l'année. Les mesures piézométriques effectuées par le BRGM à Maroua montrent qu'au droit du lit majeur des Mayos, les fluctuations saisonnières de la nappe restent inférieures ou égales à 2,5 mètres. En effet, les variations piézométriques sont soumises au rythme des crues; car ces nappes sont liées dans leur fonctionnement hydrodynamique, à l'écoulement des eaux de pluie et à leur intensité. Les transmissivités calculées par le **BRGM** en 1978 (rapport interne) sur les forages exécutés pour l'alimentation en eau potable de la ville de Maroua varient de $3*10^{-2}$ à $1.2*10^{-3}$ m^2/s. Les coefficients d'emmagasinement de $25*10^{-2}$ à $8*10^{-6}$ obtenus par les mêmes travaux sont aberrantes par rapport aux observations de **Lefèvre** (1971).

Dans le secteur de Maroua, **Lefèvre** (1971) a mesuré la vitesse d'écoulement de la nappe par injection d'une solution de chlorure de sodium et mesure en aval des variations de la conductivité ou de la résistivité. L'auteur obtient une vitesse moyenne de 35 cm/h (soit environ 10^{-2} cm/s). Pour une porosité moyenne totale de 30 % (pour un volume de sable de 304 cm^3) et une porosité efficace de l'ordre de 14 % (ce qui est un peu grand à notre avis), l'auteur a obtenu d'une part, une perméabilité moyenne de $1.14*10^{-6}$ m/s et d'autre part, un débit de sous-écoulement de 4 l/s le 1er novembre 1968 (fin de

l'écoulement superficiel) sur une section mouillée de 294 m^2 puis, 2,6 l/s le 1er mars (saison sèche) sur une section mouillée de 190 m^2 pour une baisse de niveau piézométrique de l'ordre de 80 cm.

En année moyenne, le volume d'eau qui s'écoule dans la nappe sous-fluviale du Mayo Tsanaga est selon **URBAPLAN** (1991) d'environ 100000 m^3 tandis que le volume annuel moyen d'eau de surface écoulé est voisin de $200*10^6$ soit 2000 fois plus important.

Ces nappes ont un régime d'écoulement souterrain en nappe libre. Leurs réserves régulatrices constituent la quasi totalité de leurs ressources exploitables. Elles sont accessibles à l'exploitation à faibles profondeurs. Cette situation explique les très nombreux puits qui captent et exploitent ces nappes.

Aucun niveau imperméable de grande importance ne sépare à notre connaissance les alluvions des nappes sous-fluviales des niveaux sous jacents; **leur géométrie est donc de nature à favoriser les communications avec les nappes voisines ou sous jacentes** (figure 3.4). Ainsi, plus le Mayo est important en extension et en puissance, plus significatif sera l'apport aux niveaux sous jacents; étant entendu que les alluvions des Mayos sont généralement de bonne perméabilité. C'est certainement cette capacité des nappes sous-fluviales à alimenter les niveaux sous jacents qui confère au domaine du piémont son importance.

3.3.1.2. Le système aquifère du piémont.

Le domaine de piémont est vraisemblablement la zone la plus complexe dans le domaine de l'hydrogéologie du Nord Cameroun (**Detay**, 1987). Mis à part les nappes perchées et les entités indépendantes (nappe de la plaine de Mora, nappe de la plaine du Nord Diamaré et nappe de la plaine de Kar Hay) liées à des nappes sous-fluviales , **Tillement** (1970) a considéré ce

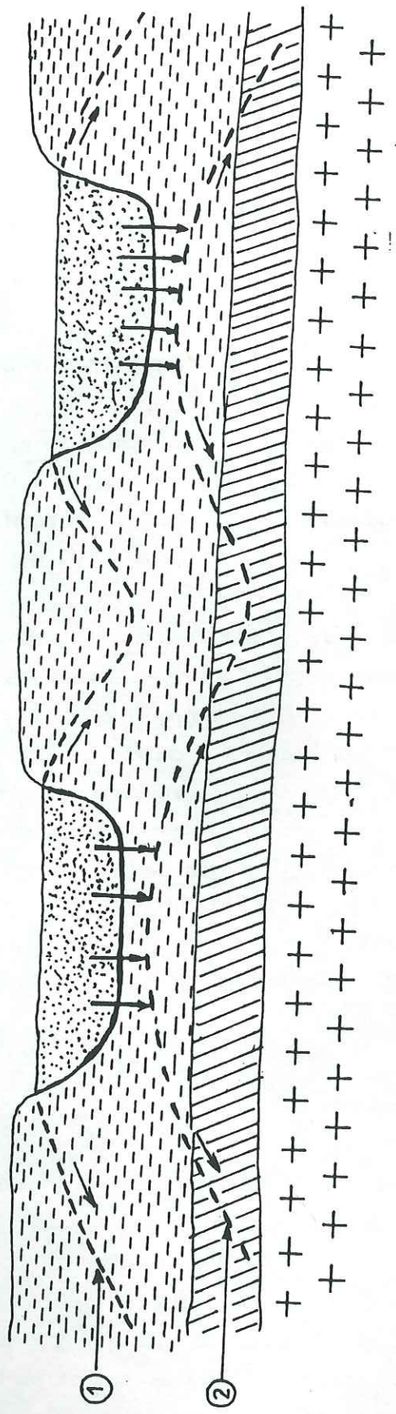


Figure 3.4. - Relation hydraulique entre les nappes sous-fluviales et le système aquifère du piémont (**Ngounou Ngatcha B**, 1993).

domaine sur le plan hydrogéologique comme stérile (cf. figure 3.2).

Au regard des fiches de forages disponibles dans la région nous avons remarqué que le niveau piézométrique apparaît soit dans les alluvions, soit dans la frange altérée (cf. figure 3.4). Ainsi, les alluvions et les altérites peuvent contenir et fournir de l'eau. Les pressions s'y équilibrent et les écoulements ont lieu de l'une des formations vers l'autre. **Bien que possédant des caractéristiques hydrodynamiques parfois spécifiques, les deux reservoirs sont en communication.**

A partir des coupes géologiques et hydrogéologiques actuellement disponibles, ainsi que le rapprochement des caractéristiques hydrodynamiques des nouveaux ouvrages de captage avec les données de l'étude statistique de **Detay** (1987) et, compte tenu du fait qu'une surface piézométrique commune peut être dessinée soit dans les alluvions soit dans les altérites, nous avons envisagé l'ensemble alluvions-altérites, comme un milieu poreux unique à perméabilité et porosité verticales variables représentant une même nappe : **le système aquifère du piémont** (figure 3.5).

Les études faites en Afrique de l'ouest par **Lelong** et **Lemoine** (1968), **Engalenc** (1979), **GUIRAUD** (1988), entre autres ont montré que la couverture altérée a une porosité totale élevée de 30 à 50 %, une porosité efficace très faible, inférieure à 4 %, et une perméabilité faible et très variable dont les valeurs moyennes sont de 10^{-7} à 10^{-5} m/s.

Les deux reservoirs (alluvions et les altérites qui jouent une fonction de stockage) du système aquifère du piémont, superposés et/ou isolés suivant leur position géographique, peuvent être drainés soit latéralement par les aquifères des Yaérés, soit verticalement, en fonction du degré de fissuration ou de fracturation du socle par un aquifère de fissures ou de fractures à rôle essentiellement conducteur.

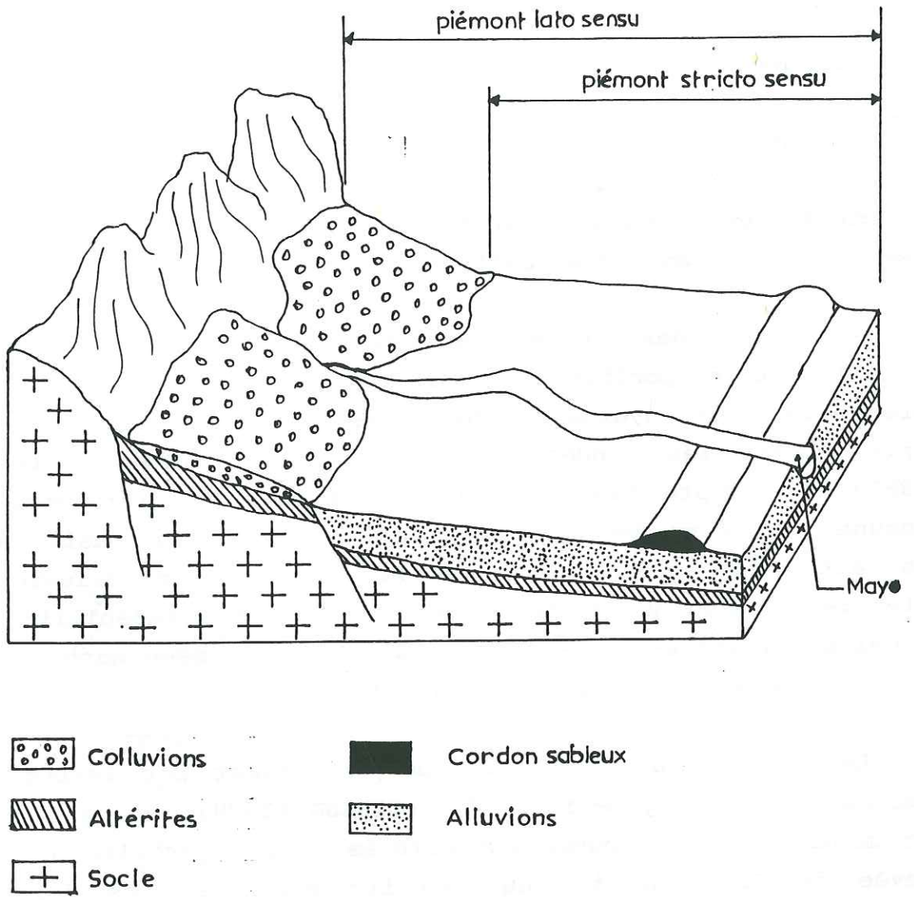


Figure 3.5. - Diagramme schématique du système aquifère du piémont (**Ngounou Ngatcha B,** 1993).

3.3.1.3. Les nappes du socle.

Bien que les principales caractéristiques des nappes du socle aient pu être établies dans les Monts Mandara (à titre d'illustration, on peut consulter les travaux de **Djeuda,** 1987), les nappes de type fissuré et/ou fracturé n'ont pas été individualisées en tant que formation aquifère dans le Grand Yaéré.

En effet, même si la plupart des forages inventoriés dans la région a atteint le socle, la reconstitution des niveaux crépinés des captages laisse voir que ce sont les alluvions ou les altérites qui sont en définitive captées. Les roches du socle sont très dispersées et n'occupent pas de domaines géographiques biens définis.

Les courbes de débit-rabattement établies par **SOGREAH/GEOLAB** (1991) lors des essais de pompage qui ont atteint les altérites ne présentent pas de palier pouvant faire penser à un effet de drainance temporaire et par conséquent à une liaison indéniable des niveaux d'alluvions ou d'altérites et de fissures. Cette analyse suggère que les fissures ou fractures ne sont pas très prononcées. Par ailleurs, le recouvrement alluvionnaire est également important.

Compte tenu de ces observations, on devrait être extrêmement circonspect sur les recherches hydrogéologiques dans les zones de socle de cette région qui, en raison de la forte densité des agglomérations, est la cible des projets d'hydraulique.

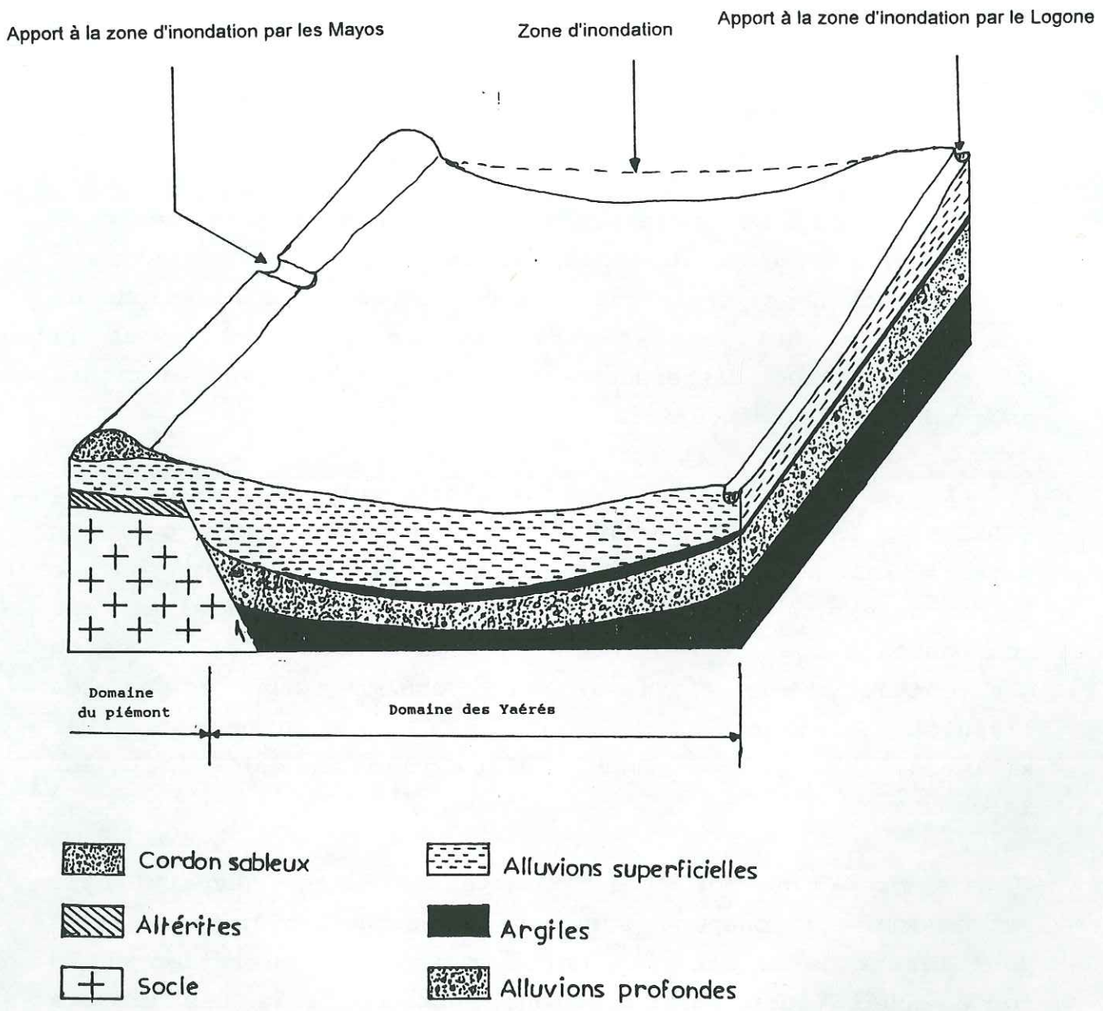


Figure 3.6. - Diagramme schématique du système aquifère alluvionnaire du Quaternaire des Yaérés (**Ngounou Ngatcha B,** 1993).

3.3.2. Le bassin hydrogéologique des Yaérés.

3.3.2.1. Le système aquifère alluvionnaire du Quaternaire des Yaérés.

Ce système a été étudié dans le détail par **Biscaldi** (1970), **Tillement** (1970) et **Detay** (1987). **Les coupes géologiques et hydrogéologiques que nous avons établies à partir des logs de forages** (cf. figure 1.9) **montrent que le Quaternaire récent est séparé du Quaternaire ancien par une mince bande d'argile compacte de 2 mètres à moins de 5 mètres de puissance en moyenne.**

Selon **Back W.** et **Hanshaw B. B.** (1965 in **Abusada S. M.** 1980), les argiles compactées peuvent fonctionner comme des membranes semi perméables. Malgré la faible puissance de la couche argileuse, son caractère régional, du moins de la zone du "Bec de Canard" (forage Poldé) jusqu'à une transversale passant entre Ndiguina et Ngodeni, nous a amené à la considérer comme un semi-perméable : **nous avons affaire à un système aquifère bicouches; le Quaternaire ancien et le Quaternaire récent étant les deux niveaux aquifères** (figure 3.6).

Les ressources en eaux souterraines du Quaternaire récent sont réparties dans des niveaux aux caractéristiques variées tant par leurs faciès (ils peuvent correspondre à des sables, des sables argileux ou des argiles plus ou moins sableuses) que par leurs extensions et leurs profondeurs. A partir des sédiments prélevés dans quelques forages exécutés dans la région de Maga dans le cadre du projet SEMRY II, le bureau d'étude SOGREAH a mesuré les perméabilités en laboratoire à l'aide du perméamètre. Pour les argiles, on a 10^{-8} m/s et pour les sables argileux $5*10^{-6}$ m/s avec des valeurs extrêmes de $4*10^{-5}$ à 10^{-6} m/s.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
15, RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TÉL. (33) 76 63 59 66
FAX. (33) 76 87 82 43

Vers la région de Waza, les faciès évoluent, deviennent plus fins, l'aquifère à un aspect lenticulaire et peut même disparaître en certains points près de la frontière avec le Nigéria. La réduction d'épaisseur des dépôts s'accompagne d'une augmentation de la composante argileuse sous jacente. La transmissivité suit cette évolution.

Le Quaternaire ancien quant à lui est représenté par une couche de sables de granulométrie généralement moyenne à grossière. Il est limité à sa base par un substratum imperméable constitué par des argiles du Pliocène supérieur; toit du Continental terminal.

3.3.2.2. Le système aquifère du Continental terminal.

Les caractéristiques hydrogéologiques disponibles sur ce système ont été décrites dans le détail (**Ngounou Ngatcha**, 1990). Les logs de forage montrent que la lithologie des dépôts est très variable et quelque peu compliquée. C'est un système aquifère de grande puissance mais, celle-ci est variable (400 à 250 mètres). Il est caractérisé par des alternances de niveaux d'argiles et de sables de différentes granulométries souvent en disposition lenticulaire et localement grésifiés (cf. figure 1.4). L'extension des couches perméables et leurs relations hydrauliques sont mal connues, car les données des forages sont très incomplètes.

A Waza, par exemple, la couche captée pour l'alimentation en eau potable du campement et du Parc est celle du Pliocène inférieur où des niveaux de sables grossiers sont intercalés dans une série argileuse. Les niveaux gréseux de l'Oligo-Miocène n'y sont pas reconnus. Les eaux y sont fortement minéralisées.

Le substratum du continental terminal est représenté par le socle panafricain et éventuellement par les formations de la zone d'effondrement de NGODENI dont les dépôts ne sont pas encore caractérisés.

050 030959 2

La couverture comprend une épaisse couche argileuse à argilo-sableuse d'âge plio-pléistocène ancien. Cette couverture met généralement la nappe en charge.

3.4. Conclusion.

Le Grand Yaéré renferme plusieurs horizons aquifères superposés, situés dans la frange altérée du socle, ainsi que dans les dépôts du Cénozoïque et du Quaternaire.

Les nappes du socle au sens strict ne sont pas représentées dans la région.

Le système aquifère du Continental terminal est sollicité actuellement par quelques forages seulement dans la localité de Waza. Il s'agit d'un système encore sous utilisé qui représente certainement une ressource potentielle pour la région. Son aire de recharge doit se trouver au Sud de la région du "Bec de Canard" (territoire tchadien) où le Continental terminal affleure (**Pias**, 1962).

Les systèmes aquifères du Quaternaire constituent les principales ressources en eau exploitées par les populations urbaines et rurales en raison de la faible profondeur des niveaux et de la nature meuble des dépôts qui permettent un fonçage des forages à des faibles coûts ou des puits avec des techniques rudimentaires. **Du fait de ces multiples sollicitations, les systèmes aquifères du Quaternaire méritent une attention particulière.**

01 SEP. 2003
Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES SYSTEMES AQUIFERES DU QUATERNAIRE DU GRAND YAERE.

"L'eau reste la grande dénonciatrice des secrets de la terre, et la plus belle source n'est qu'une trahison de ses entrailles."

GIRAUDOUX. La folle de chaillot.

Chapitre 4. STRUCTURE ET DYNAMIQUE DES NAPPES.

Chapitre 5. CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES.

Chapitre 6. CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES.

Chapitre 4. STRUCTURE ET DYNAMIQUE DES NAPPES.

4.1. Introduction.

4.2. Inventaire des points d'eau réalisés dans le Grand Yaéré.

4.3. Présentation du périmètre choisi.

4.4. Structure des aquifères.

4.5. Piézométrie des nappes.

4.6. Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

4.7. Conclusion.

4.1. Introduction.

Ce chapitre est consacré à l'analyse des caractéristiques intrinsèques détaillées du réservoir : sa structure, sa géométrie, sa piézométrie et ses paramètres hydrauliques.

L'exploitation des données de terrain et de l'inventaire des coupes de forages existants dans la région est faite essentiellement de manière graphique : contruction des diagrammes statistiques de distribution et des cartes de variabilité spatiale des différents paramètres hydrogéologiques étudiés.

L'ensemble des informations recueillies a pour objectif de rechercher un schéma hydrodynamique global de la nappe et d'évaluer, les réserves en eau des aquifères, leurs taux et leurs périodes de renouvellement, ainsi que la durée probable de leurs exploitations.

4.2. Inventaire des points d'eau réalisés dans le Grand Yaéré.

Avant de nous rendre sur le terrain, le premier travail a consisté au dépouillement de toutes les archives, rapports, thèses... pouvant contenir des informations relatives aux coupes de forages, à la photogéologie, aux sondages électriques et aux pompages d'essai. Ces informations ont été recherchées au Ministère des Mines, de l'Eau et de l'Energie, au Ministère de l'Agriculture, au Ministère du Tourisme et dans quelques organismes de recherches ou sociétés : l'ORSTOM, le BRGM, le FONADER, FORACO...

A l'aide des rapports et des fiches techniques des points d'eau établis dans le cadre de divers projets d'hydraulique, nous avons procédé à un inventaire systématique de tous les ouvrages modernes (forages et puits bétonnés) à l'exclusion des puits familiaux de concession et des points d'eau traditionnels (puisards).

Au total, **nous avons recensé environ 400 ouvrages** répartis dans l'ensemble du Grand Yaéré. **Cet inventaire ne prend en compte que les ouvrages postérieurs à 1983.** Il faut ajouter que les données de 1983 à 1986 sont moins complètes que celles de 1989 à 1991. Pour chaque ouvrage, les composantes suivantes ont été retenues :

- la localité dans laquelle le forage a été exécuté;
- les coordonnées géographiques de l'ouvrage, (X et Y);
- la cote de l'ouvrage par rapport au niveau de la mer (Z);
- le type d'ouvrage (P = puits et F = forages);
- la profondeur de l'aquifère (Prof.);
- la cote du mur de l'aquifère par rapport au niveau de la mer (Mur);
- l'épaisseur de l'aquifère (Epais);
- le niveau piézométrique (NP);
- le niveau statique (NS);
- le débit de pompage (Q);
- le débit spécifique (Q/s);
- la transmissivité (T);
- la conductivité (Cond);
- le pH;
- la température (t).

Toutes les données collectées ont fait l'objet par nous, d'une vérification et d'une homogénéisation, puis d'une saisie informatique et constitution de fichiers sur micro-ordinateur. Ces fichiers sont dénommés "invforag" (inventaire des forages) et "invpuits" (inventaire des puits) qui sont reproductibles et utilisables sous forme de graphiques et/ou de cartes thématiques par l'intermédiare d'autres logiciels de traitement statistique et de cartographie automatique.

Le contrôle sur le terrain des points d'eau inventoriés a immédiatement démontré la faible représentativité de cet inventaire car, un grand nombre d'ouvrages est devenu

inutilisable en raison du dénoyage, de l'ensablement ou du manque d'entretien des pompes.

La répartition des ouvrages varie en fonction des localités et des aquifères. Dans le piémont où il y a un fort peuplement et de bons réservoirs, on trouve de nombreux ouvrages. Par contre, dans les Yaérés où la profondeur à forer est importante, et du fait que c'est une zone à haut risque en raison des inondations, donc à faible peuplement, on ne rencontre que très peu de points d'eau. Le Grand Yaéré est donc caractérisé dans son ensemble par une vaste zone à faible densité de données.

En raison de la dispersion des villages et de leur accès très difficile, nous n'avons pu effectuer nos prélèvements que sur une soixantaine d'ouvrages environ, donc dans une portion très localisée à l'échelle de la région. **En définitive, nous avons choisi un secteur témoin qui totalise environ 200 ouvrages, dans lequel nous allons entreprendre une étude de détail destinée à rassembler toutes les informations indispensables à l'évaluation des ressources en eau souterraine des différents aquifères et des conditions de leur exploitation.**

Detay (1987) en s'appuyant sur une analyse statistique et probabiliste, a fait une interprétation des données des forages réalisés entre 1983 et 1986. Du fait de la similitude qu'il y a entre les données de 1983-1986 et celles obtenues entre 1989 et 1991, il n'est pas utile de reinterpréter statistiquement les données des 400 ouvrages. Dans le secteur choisi, **nous allons nous attacher plus à l'étude de la variabilité spatiale des paramètres géologiques et hydrogéologiques recensés.**

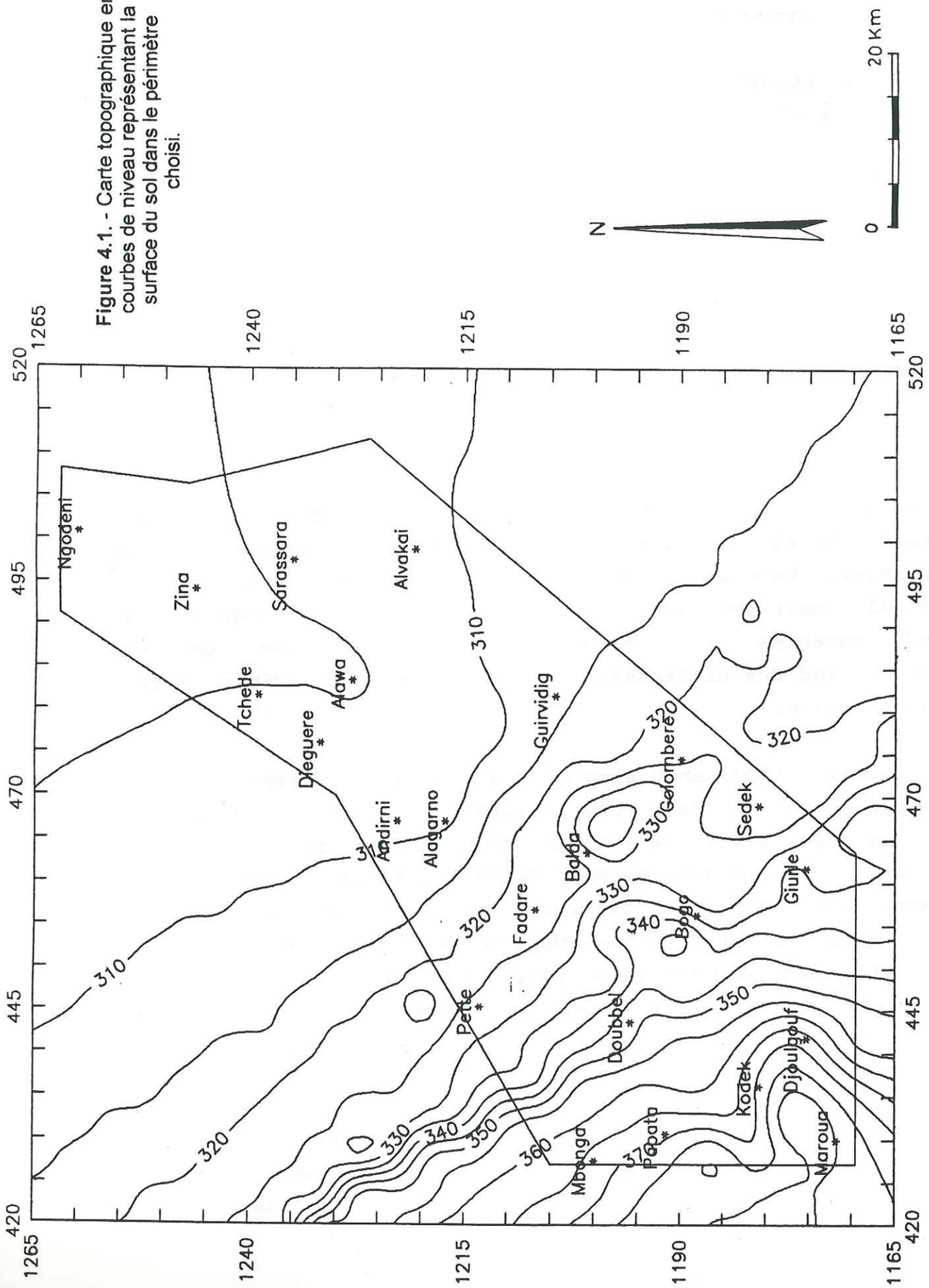


Figure 4.1. - Carte topographique en courbes de niveau représentant la surface du sol dans le périmètre choisi.

4.3. Présentation du périmètre choisi.

Le périmètre choisi couvre une superficie de 4000 km^2 environ entre les parallèles 10°35 et 11°25 de latitudes Nord et les longitudes 14°20 et 15°02 de méridiens Est. Ce secteur (figure 4.1) est limité à l'Ouest par une transversale passant entre Maroua et Papata. Au Sud-Ouest, la limite est représentée par le Mayo Ranéo. Au Sud et au Sud-Est par l'interfluve entre le Mayo Tsanaga et le Mayo Boula. A l'Est et au Nord-Est par le Mayo Logomatia. Les limites WSW et SSE se prolongent respectivement par les contours NE du parc de Waza jusqu'à Ngodeni et par une transversale qui part du Sud de Guingley jusqu'au Sud de Alvakai, point d'intersection avec le Mayo Logomatia.

Le choix de ce domaine pour y mener nos investigations dans le cadre de la problématique énoncée tient à plusieurs facteurs :

- il couvre les différents ensembles géomorphologique, géologique et hydrogéologique de la région. En effet, il englobe le cordon sableux dans son trajet Fadaré-Guingley et la zone des dépressions entre Andirni-Alagarno et Djiddel-Guingley. En amont du cordon, c'est le piémont et en aval, c'est le domaine des inondations ou Yaérés;

- cette zone présente une importante agglomération urbaine et rurale. Elle regroupe environ 800000 habitants, ce qui implique que le rôle que ces systèmes aquifères sont susceptibles de jouer pour l'alimentation en eau potable des collectivités rurales et villageoises est considérable;

- des aménagements hydro-agricoles (projet d'aménagements hydroagricoles dans la zone du Mayo Tsanaga, SEMRY, SODECOTON), agro-pastoraux (sauvegarde de la Réserve Nationale de Waza) et industriels sont en perspectives dans la région;

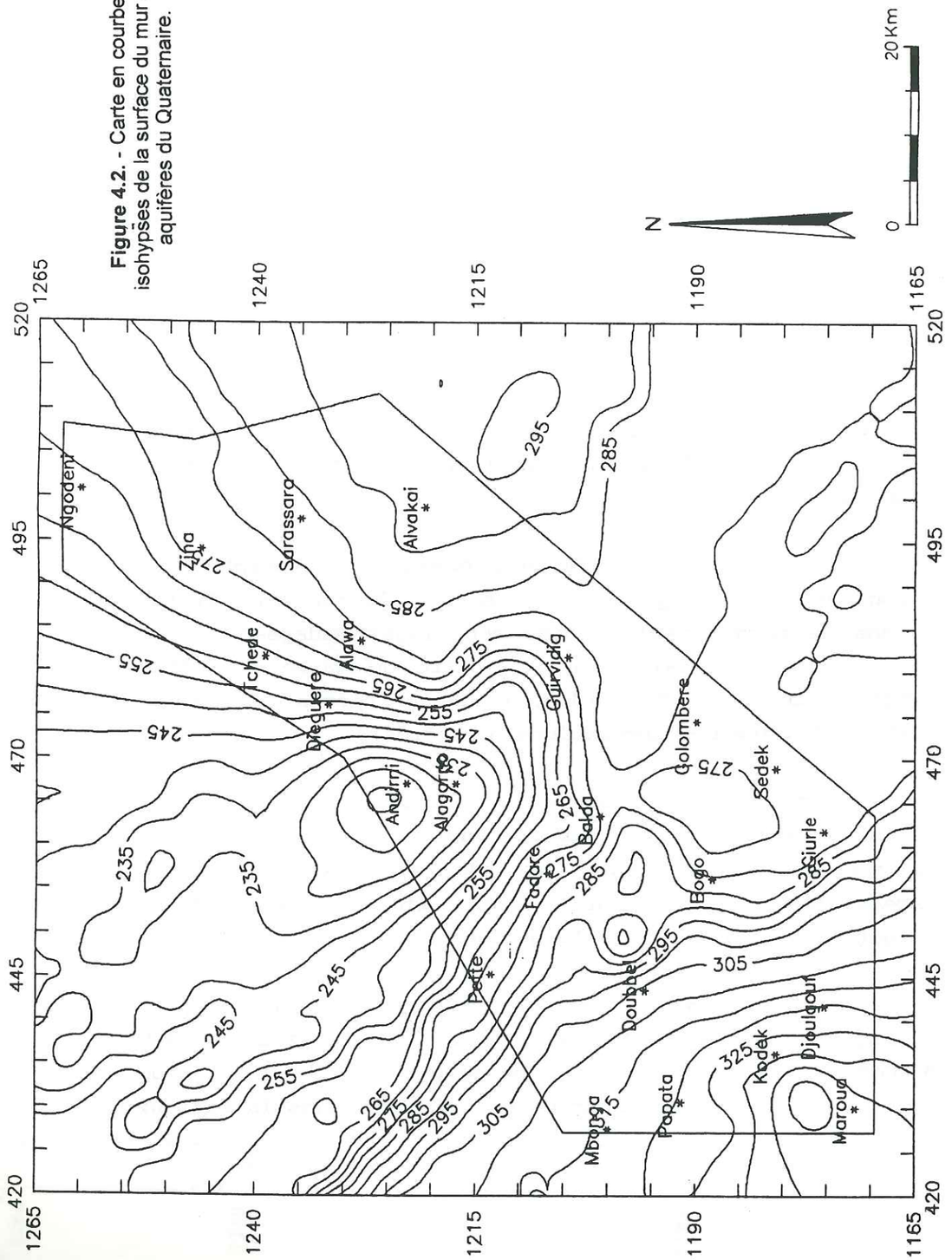


Figure 4.2. - Carte en courbes isohypses de la surface du mur des aquifères du Quaternaire.

- de nombreux ouvrages exécutés par les projets d'hydrauliques auxquels nous devons la majeure partie de nos données sont relatifs à cette zone. De plus, ces données paraissent suffisantes pour que les paramètres calculés soient assez représentatifs.

Il ne s'agit pas d'unités hydrogéologiques au sens classique du terme, généralement limitées par les lignes de crêtes piézométriques ou les lignes de partage des eaux.

Les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des systèmes aquifères auxquels appartient ce secteur ont été largement abordées dans la première partie de ce mémoire. Nous n'allons y revenir que pour discuter les différentes hypothèses qui sont admises.

4.4. Structure des aquifères.

L'étude de la géométrie de l'aquifère a été faite à partir de l'analyse des fiches techniques d'environ 173 forages d'alimentation en eau potable (tableau A4.1a et A4.1b en annexe 2). Compte tenu de la superficie du domaine concerné par nos études (environ 4000 km^2), la densité moyenne de répartition des points d'eau n'est pas bonne.

Toutefois, afin d'avoir une vue générale, l'aquifère a été représenté par des cartes structurales; en courbes isohypses de la surface du substratum imperméable, en courbes isobathes de la profondeur des aquifères et en courbes isopaches de l'épaisseur des aquifères, à l'aide du logiciel SURFER et d'une table traçante.

4.4.1. Carte de la surface du mur des aquifères (figure 4.2).

Par rapport au niveau de la mer, la position minimale du mur est à la cote 214 m (Andirni) et la position maximale à la cote 345 m (secteur de Maroua). La répartition géographique de

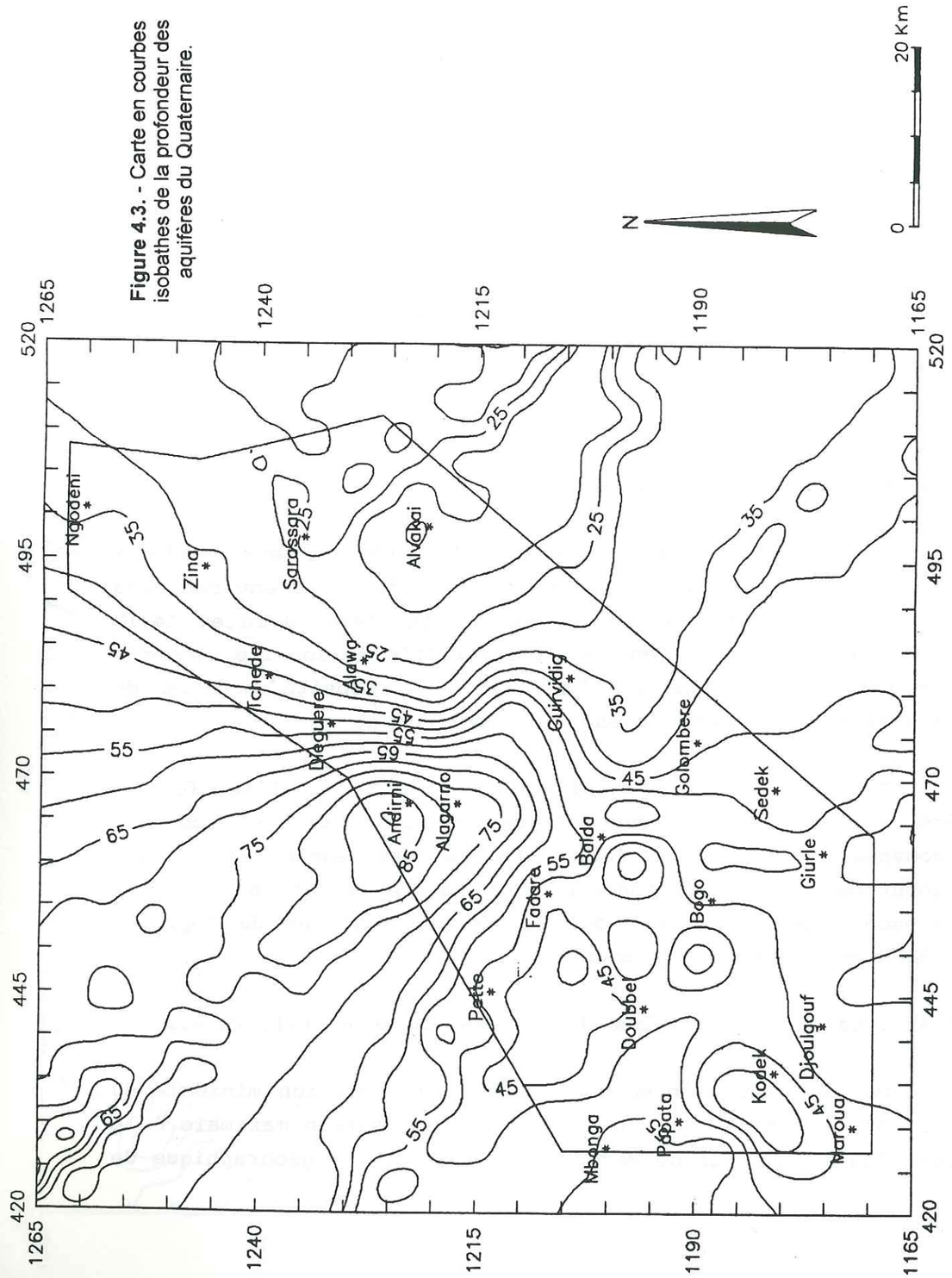


Figure 4.3. - Carte en courbes isobathes de la profondeur des aquifères du Quaternaire.

la cote du substratum imperméable montre que cette dernière varie en chaque point de la plaine.

Du côté du piémont, le mur de l'aquifère coïncide avec le socle précambrien et/ou les granites du Cénozoïque. Dans le Yaéré, le mur est représenté par la série argileuse du Plio-Pléistocène. Cette série se situe à une profondeur moyenne de -60 m. En raison de la mauvaise répartition des données dans le Yaéré, la position du mur imperméable des aquifères profonds est mal connue.

Suivant les axes Pette-Guirvidig et Guirvidig-Diéguéré, on observe une rupture brutale des courbes isohypses de la surface du substratum imperméable. Cette anomalie apparaît également sur la carte isobathe.

4.4.2. Carte de la profondeur des aquifères (figure 4.3).

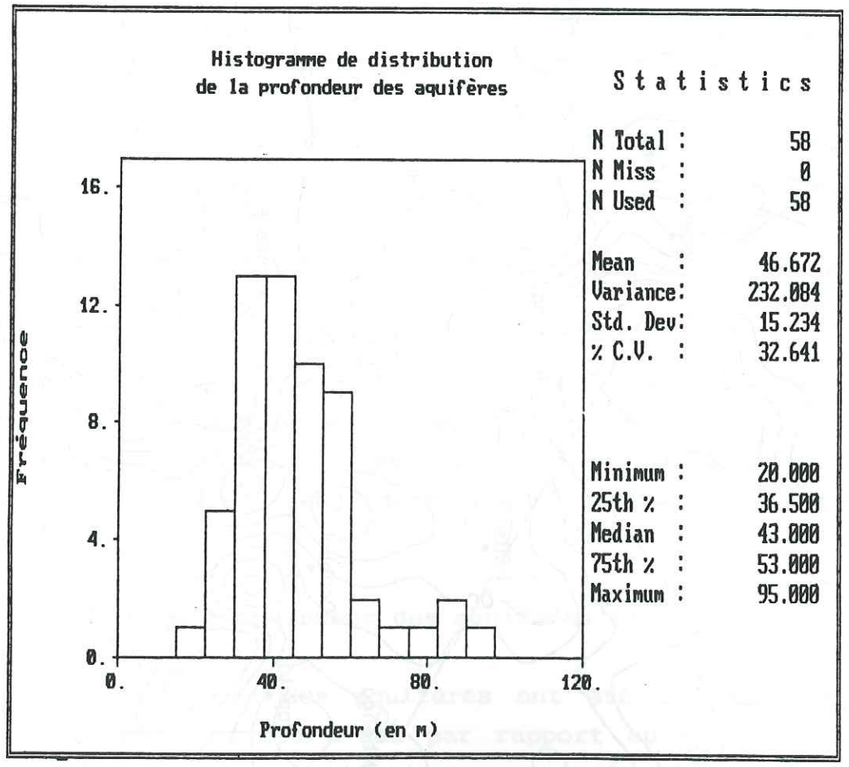


Figure 4.4.

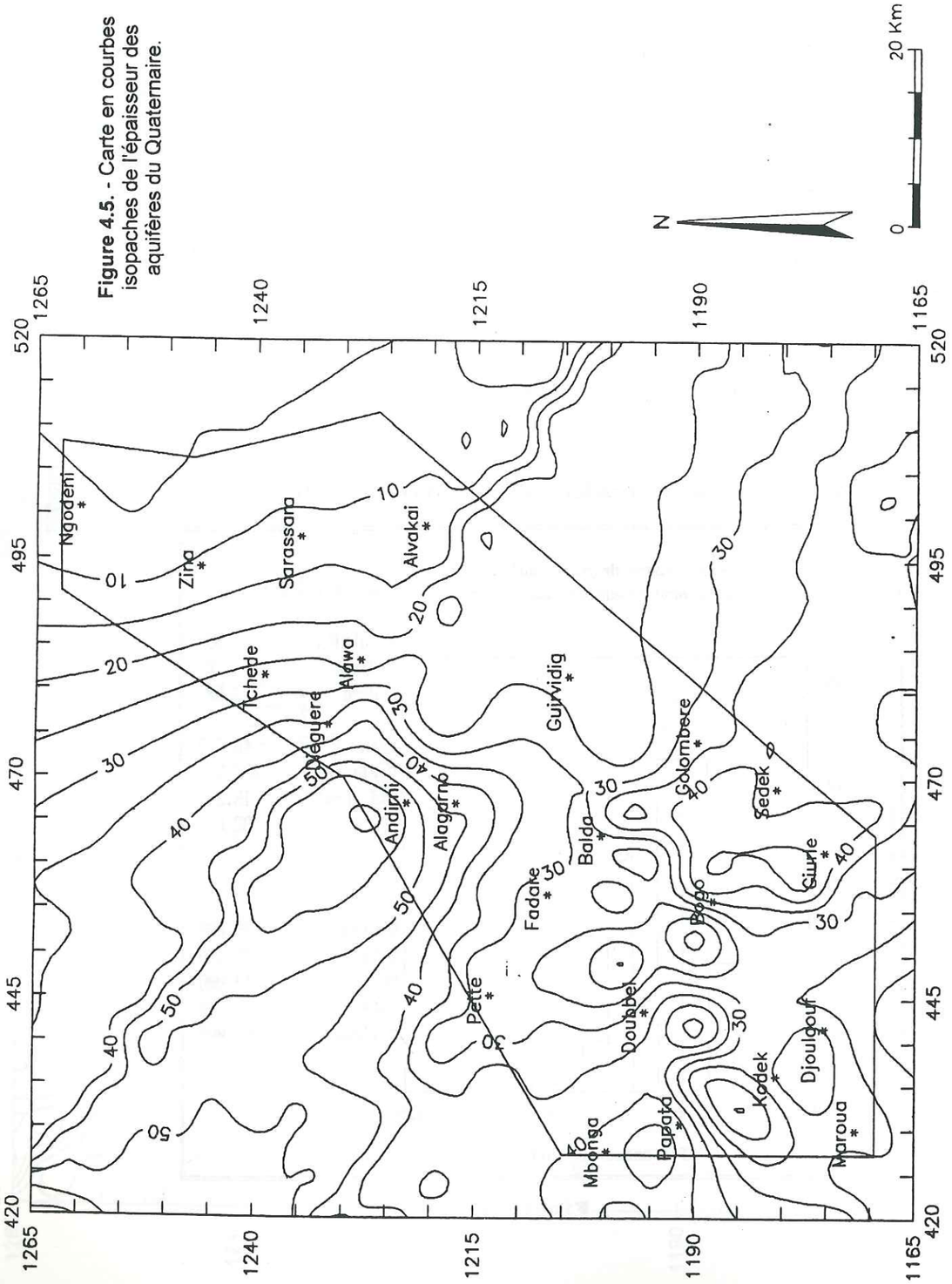


Figure 4.5. - Carte en courbes isopaches de l'épaisseur des aquifères du Quaternaire.

La profondeur minimum est de 20 m et la profondeur maximum de 95 m. La moyenne est estimée à 46 m. Plus de 75 % des points ont des profondeurs comprises entre 20 et 53 mètres, 25 % étant répartis entre 53 et 95 mètrtes. Le coefficient de variation est faible (figure 4.4).

Les maximas se trouvent dans le domaine des Yaérés. Ils concernent les secteurs de Alagarno et de Andirni où l'on dispose des ouvrages captant les niveaux aquifères profonds. En aval de ces secteurs, les profondeurs se répartissent de la même manière que dans la plaine de piémont. Cependant, dans le piémont, on observe quelques perturbations liées aux remontées de socle qui diminuent le recouvrement sédimentaire par suite d'érosion (figure 4.3).

L'étude géologique a montré que les formations qui constituent les aquifères sont très complexes dans le détail. Toutefois, du point de vue hydrogéologique, on peut distinguer deux unités sédimentologiques :

- des niveaux à sables dominants avec des passages d'argiles et;

- des niveaux à argiles ou altérites dominants avec des passages de sables.

Ces deux unités forment généralement une séquence argile-sable ou sable-argile qui alterne de façon variable suivant les sondages. La présence de niveaux peu perméables entre les niveaux perméables rend difficile l'estimation précise du réservoir utile.

4.4.3. Carte de l'épaisseur des aquifères (figure 4.5).

Les épaisseurs des aquifères ont été obtenues à partir des mesures du niveau d'eau par rapport au sol. L'épaisseur minimale est de 5 m et l'épaisseur maximale 62,80 m. L'étendue

d'environ 60 m entre les deux valeurs est liée à la variation des niveaux d'eau qui est considérable dans certaines portions des aquifères du fait de la mise en charge par des niveaux d'argiles. L'épaisseur moyenne est d'environ 30 m. Plus de 75 % des valeurs sont réparties entre 5 et 36 m (figures 4.6).

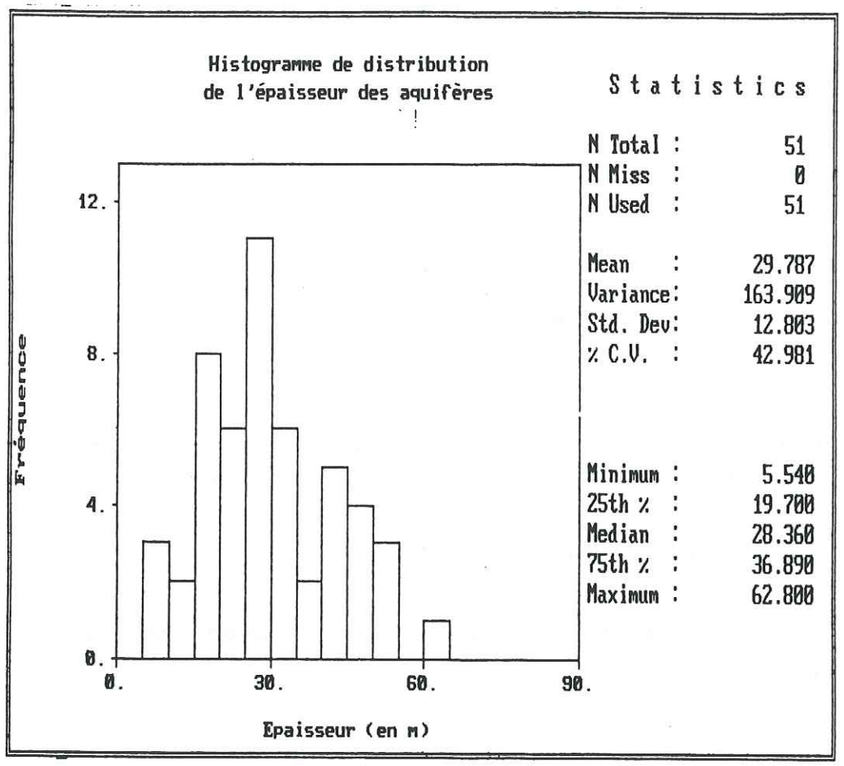


Figure 4.6.

Dans le piémont, la discontinuté latérale du réservoir apparaît bien sur la figure 4.5. Dans le domaine des Yaérés, l'épaississement se fait régulièrement en direction de Alagarno-Andirni qui, comme sur les cartes précédentes, apparaît comme l'axe de plongement du substratum imperméable des aquifères profonds.

La figure 4.5 donne des indications sur la profondeur qu'il faut atteindre par sondage, pour avoir une exploitation complète des réservoirs aquifères. Elle reste le meilleur instrument de base pour l'évaluation des réserves des nappes.

C'est également un paramètre de rendement important dans l'élaboration des projets d'hydraulique car, il conditionne le coût d'investissement et d'exhaure.

4.4.4. Conclusion.

La configuration des nappes, quoi qu'elle soit approximative, faute de données convenablement distribuées, fait apparaître deux compartiments bien distincts marqués sur les cartes précédentes par une rupture au passage de l'axe Guirvidig-Andirni.

- Dans le piémont, les dépôts constituent un système hydrogéologique unique.

- Dans le Yaéré, la piézométrie plaide en faveur de l'existence de plusieurs horizons aquifères.

4.5. Piézométrie des nappes.

4.5.1. Introduction.

Notre domaine d'étude ne dispose pas d'un réseau piézométrique d'observation permettant d'obtenir l'évolution des niveaux d'eau des nappes en hautes eaux et en basses eaux. Considérée dans le temps, la piézométrie n'a été suivie que sur quelques points d'eau. L'examen rapide des relevés de niveau indique une très faible amplitude des variations dans les niveaux profonds.

L'exploitation des mesures de niveau d'eau pratiquées durant les projets d'hydraulique, en fin de foration, avant les pompages d'essais entre 1989 et 1991 et celles effectuées pendant nos campagnes de terrain (dans les puits modernes et quelques puits traditionnels) entre 1989 et 1991, nous a permis de retracer la distribution spatiale des niveaux piézométriques dans le périmètre choisi (figure 4.7).

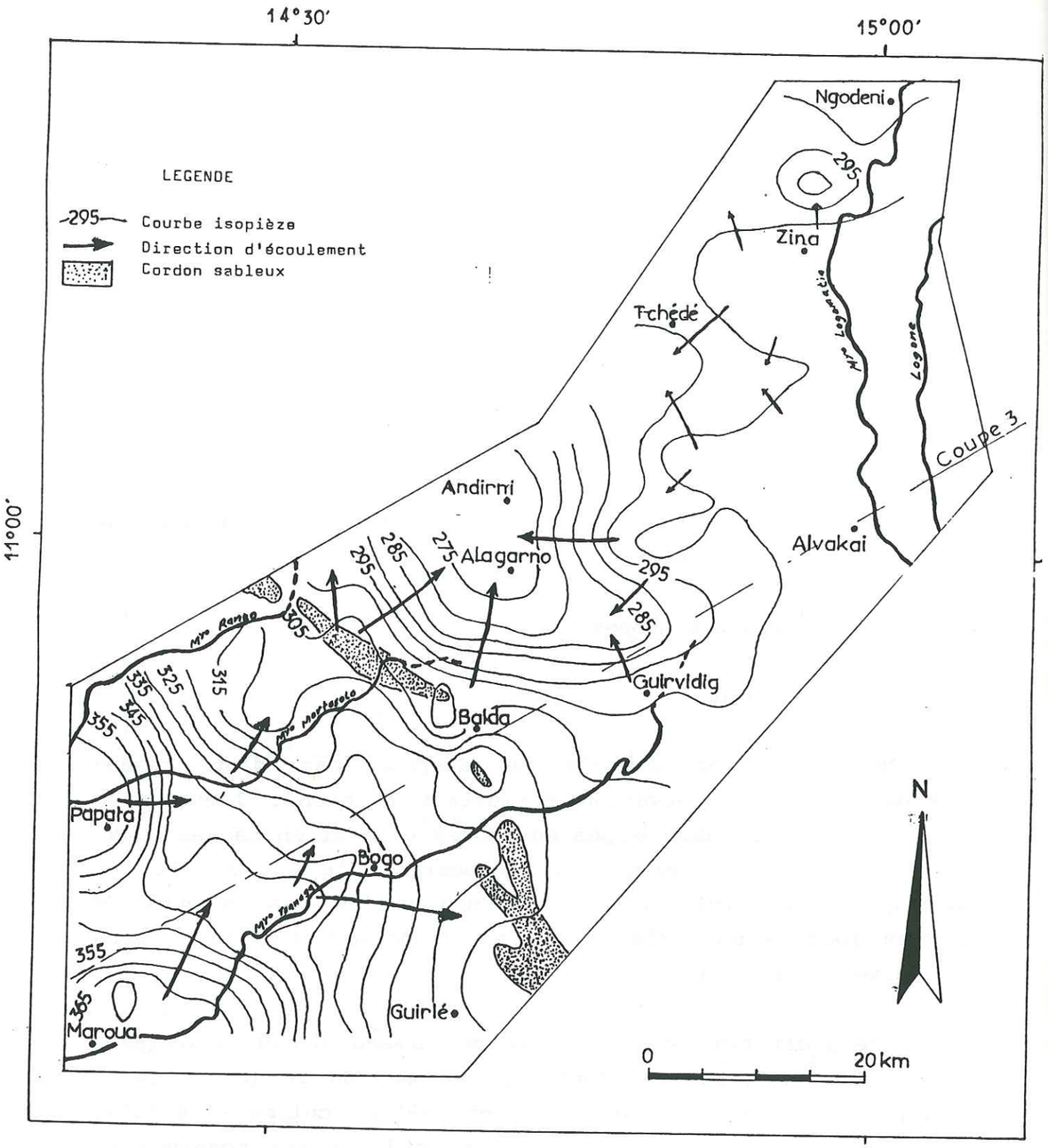


Figure 4.7. - Carte en courbes isohypses de la morphologie de la surface piézométrique moyenne des nappes des alluvions du Quaternaire.

Il importe de souligner que la construction de cette carte pour un domaine aussi vaste (4000 km^2 environ) avec des contextes hydrogéologiques variés et sur la base des relevés de niveaux piézométriques de précisions variables et échelonnés dans le temps impose quelques hypothèses simplificatrices qui ne rendent cette carte significative qu'à grande échelle.

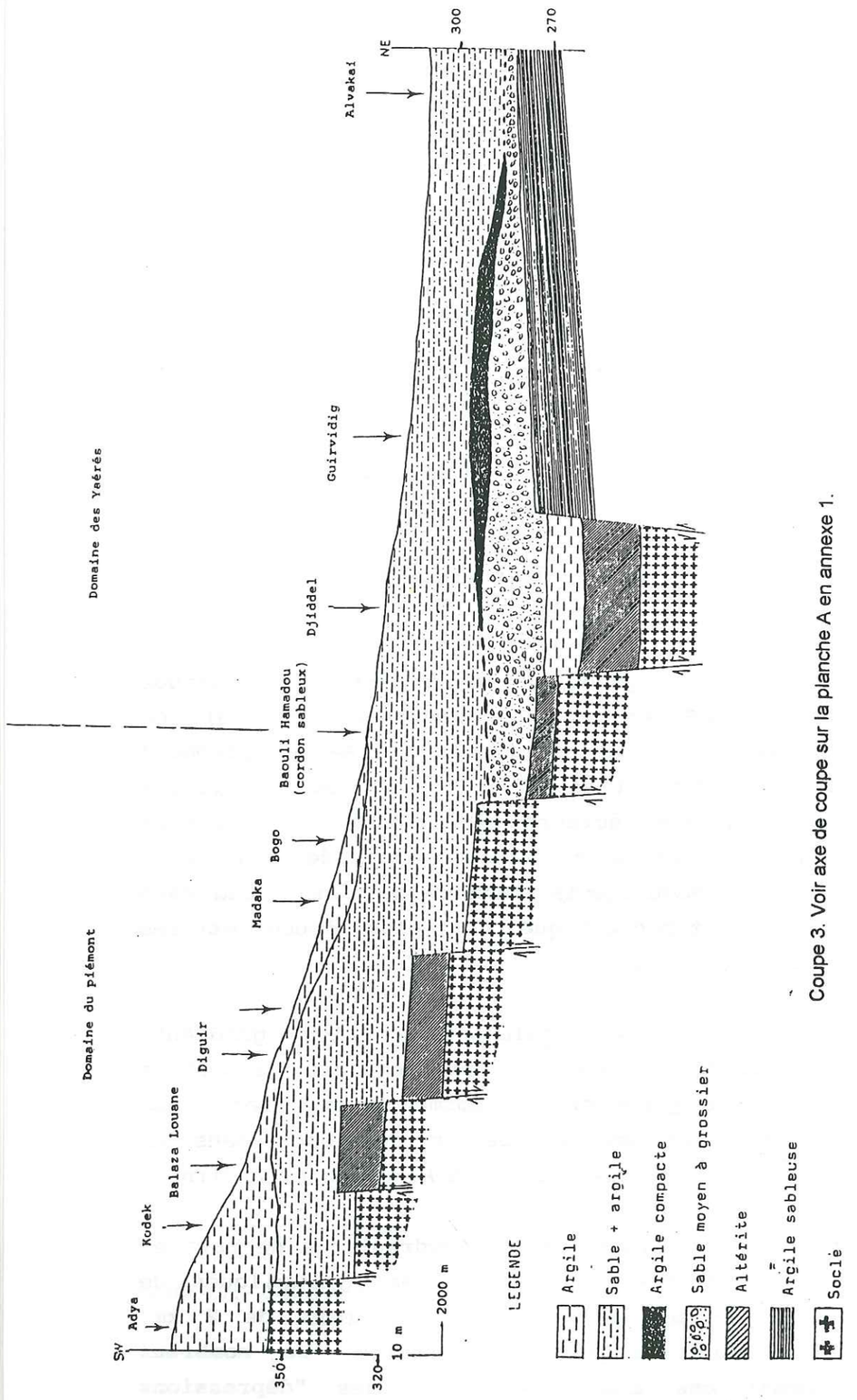
Ainsi, dans le domaine des Yaérés où il existe probablement plusieurs niveaux aquifères, nous avons adopté le niveau piézométrique du réservoir aquifère capté. Dans le piémont, nous avons confondu les niveaux de la nappe dans les alluvions et ceux situés dans les altérites.

4.5.2. Carte de la morphologie de la surface piézométrique des nappes.

D'un point de vue général, le niveau piézométrique diminue du SW et du NE vers Alagarno-Andirni. Cependant, on observe des perturbations locales; secteur de Balda (piémont) et axe Guirvidig-Ngodeni (Yaérés). Toutes ces conditions dépendent étroitement des facteurs géologiques : le piémont renferme quelques inselbergs qui sont autant de conditions perturbantes pour les écoulements souterrains tandis que dans le Yaéré, la pente topographique est plus douce et les gradients sont plus faibles.

Les deux directions d'écoulement et les gradients hydrauliques sont conformes à ce que présenterait un système simple, comportant une géométrie en forme de gouttière, une alimentation latérale et une évacuation des eaux dans un exutoire axial, axe de drainage, centré à Alagarno et Andirni.

L'augmentation brutale du gradient hydraulique de part et d'autre de cet axe (différence de charges hydrauliques de l'ordre de 30 mètres sur une distance de moins de 2 km) suscite des interrogations sur son origine. **De nombreux auteurs considèrent ces anomalies commme des "dépressions**



Coupe 3. Voir axe de coupe sur la planche A en annexe 1.

Figure 4.8. - Coupe géologique dans les sédiments quaternaires du périmètre étudié.
(Ngaoundéré - Ngaoundal - Ngaoundéré **Ngatcha B.**, 1993)

piézométriques fermées" liées à la vidange de la nappe par l'évaporation et l'évapotranspiration.

Nous avons fait une coupe géologique (voir axe de coupe sur la figure 4.7) complémentaire à la figure 1.9 (cf. chapitre 1). Cette coupe (figure 4.8) n'est pas en faveur de hypothèse avancée. **Elle suggère, comme** les analyses chimiques et isotopiques **nous le confirmeront dans les chapitres 5, 6 et 7, une discontinuité hydraulique liée à la présence dans le domaine des Yaérés de niveaux aquifères suspendus et de niveaux très profonds.** Cette disposition exclut la communication hydraulique directe entre les niveaux aquifères superficiels du piémont et ceux des Yaérés.

Sur la figure 4.7, le Mayo Tsanaga permet de voir dans les environs de Bogo, le lien étroit qui existe entre la nappe et la rivière. Théoriquement, on devrait avoir la même chose avec le Mayo Motorsolo. Cependant, cette relation n'est pas perceptible. Cela est peut être lié à l'échelle de la carte ou à 'insuffisance de points de mesure rapprochés le long des axes des cours d'eau.

L'absence de relation "visible" entre la nappe et les mayos en certains points peut également s'expliquer par le fait que la recharge des nappes par les cours d'eau (mayos) se fait de façon linéaire; le cours d'eau étant perché au dessus des alluvions qu'il alimente tout au long de sa trajectoire (cf. figure 3.4). Dans ces conditions, les principaux caractères du régime des cours d'eau diffèrent entre eux par des nuances provoquées soit :

- par la pluviosité : les infiltrations directes à travers les mayos sont très variables car, liées à la régularité du régime pluviométrique;

- par le cadre hydrogéologique : présence au sein du mayo d'une nappe sous-fluviale importante ou peu importante;

- par la géomorphologie, nuances qui se traduisent tantôt par une certaine variabilité de la lame d'eau moyenne écoulée, tantôt par un tarissement plus ou moins durable, selon que l'un ou l'autre des facteurs évoqués précédemment évolue dans un sens ou dans l'autre.

Dans les Mayos de faibles importances, l'absence de réserves souterraines ne permet pas la persistance d'un débit d'étiage. Par ailleurs, l'écoulement permanent s'arrête au bout d'un certain parcours après avoir rempli les dépressions du lit majeur, où il est épuisé par les processus d'évaporation.

L'allure des axes d'écoulement suggère un apport des eaux de précipitation à partir des flancs des massifs rocheux situés sur l'axe Maroua-Papata. Par ailleurs, suivant l'axe Guirvigig-Ngodeni, les directions d'écoulement témoignent d'une alimentation de la nappe à partir des mares.

4.5.3. Evolution de la piézométrie depuis 1970.

Dans le Grand Yaéré, l'exploitation des eaux souterraines ne connait pas un rythme accéléré. Les forages équipés de pompes à motricité humaine et les puits bétonnés sont très dispersés et l'on peut considérer que l'évolution piézométrique observée depuis la foration est proche d'une évolution en régime naturel.

Cette hypothèse est confortée par la similitude entre les cartes hydrogéologiques de synthèse de **Tillement** (1970), **Detay** (1987) et celle que nous avons établie à l'échelle du périmètre étudié. Cela implique que, depuis plus de 20 ans, aucun déséquilibre permanent ne s'est manifesté. Dans le chapitre 8, nous verrons que cette situation est due au fait que la recharge effective, pendant la saison des pluies à l'échelle régionale, est importante, voire supérieure à l'exploitation actuelle.

Dans ce contexte, on se trouve dans un système aquifère en équilibre, où les apports compensent les sorties. Toutefois, cet équilibre est fragile car, une diminution de la pluviométrie qui se traduirait par un déficit de pluie efficace annuel, peut provoquer un abaissement de la surface piézométrique, comme ce fut le cas pendant la période sèche de 1983/1984 où l'on a enregistré des baisses de niveaux de l'ordre de 2 mètres.

4.5.4. Conclusion.

Si dans le détail le milieu aquifère est très hétérogène, considéré à l'échelle de 1/500000^{e}, le réseau de courbes isopièzes fait apparaître un écoulement régulier. L'axe de drainage suit parallèlement le cordon en aval.

L'absence de suivi piézométrique régulier en hautes eaux et en basses eaux, ne permet pas d'extrapoler aux nappes du Grand Yaéré. En effet, dans cette région, comme dans toutes les régions arides ou semi-arides, l'évolution de la piézométrie dans le temps est un paramètre indicateur de l'équilibre quantitatif qui existe entre la recharge et les sorties.

A défaut de mettre en place un réseau d'observation dans tout le Grand Yaéré, des réseaux locaux (quelques piézomètres) doivent être mis en place dans des zones témoins afin d'avoir un regard sur les variations à l'échelle locale et sur l'amplitude des fluctuations saisonnières.

Dans les Yaérés, la présence d'une séquence alternée de formations perméables et peu perméables, alliées à la structure générale en forme de cuvette, rend possible l'occurence d'eaux en charge et même artésiennes.

Tableaux 4.1a. - Caractéristiques hydrauliques des ouvrages de captage.

LOCALITE	X (km)	Y (km)	Z (m)	Q (m3/h)	rabat (m)	Q/S (m3/h/m)	T (10-4) (m2/s)	Date
Adya	430,7	1184,4	367	1,8	2,1	0,860		29/3/90
Alagarno	467,1	1217,2	309	5,9	2,2	2,710	3,800	04/3/90
Alagarno disp	467,1	1217,2	309	2,6	3,6			2/12/85
Alagarno Gouna	463,5	1217,2	309	5,8	1,4	4,140	3,000	9/12/90
Alvakai I	499,9	1220,8	309	3,6	0,4			Fev. 87
Andirni	467,1	1224,5	309	2,0	9,6	0,210	0,150	29/5/90
Assideo	430,7	1182,6	367	0,7	16,1	0,040	0,350	4/4/90
Balaza Alcali	441,7	1182,6	358	3,0	8,7			15/11/85
Balaza Garre	441,7	1182,6	358	5,2	14,4			3/12/85
Balaza Louane	439,8	1182,6	363	4,2	1,9	2,170	4,500	23/12/90
Balaza Louane	439,8	1182,6	363	1,2	4,6	0,260	0,130	22/12/90
Balda	463,5	1200,8	320	2,1	6,7	0,310	0,370	16/11/90
Balda	461,7	1200,8	320	2,3	8,4	0,270	0,180	10/11/90
Balda	463,5	1200,8	320	0,9	8,3	0,110	0,100	12/11/90
Balda	461,7	1200,8	320	1,5	17,7	0,080	0,082	07/11/90
Balda	461,7	1200,8	320	6,6	2,5	2,630	3,100	04/11/90
Bogo I	456,2	1188,1	330	6,4	5,3	1,210		24/10/84
Danki	459,9	1195,4	330	6,0	2,0	2,970		28/11/84
Diguir	445,3	1186,3	354	7,8	2,2	3,560	12,000	17/12/90
Diguir	445,3	1186,3	354	1,4	12,8	0,110	0,074	30/4/90
Djarengol	430,7	1175,3	385	2,4	6,7	0,360		19/4/90
Djarengol	432,6	1177,2	385	2,3	15,3	0,150	0,110	23/4/90
Djarengol	430,7	1175,3	385	4,0	7,9	0,510	0,810	17/4/90
Djarengol Dogba	432,6	1177,2		6,0	0,5			5/3/91
Djiddel	472,6	1197,2	321	0,7	6,6	0,110		9/6/90
Djiddel	472,6	1197,2	321	1,8	1,5	1,220	3,300	8/6/90
Djinabalam	476,2	1219,0	309	2,0	5,1	0,390	0,180	6/1/90
Djinabalam	476,2	1219,0	309	3,0	4,6	0,650	0,400	7/1/90
Fadare Abbawa	456,2	1206,3	323	7,2	7,1	1,010	0,520	29/11/90
Fadare Abbawa	456,2	1206,3	323	4,9	15,4	0,320	0,350	30/11/90
Gada Bouwol	436,2	1180,8	370	0,7	27,6	0,030	0,041	24/4/90
Gada Louggol	448,9	1200,8	334	2,1	6,0	0,340	7,000	16/10/90
Gado mayo	469,0	1195,4	340	3,0	5,1			16/11/85
Gayak	430,7	1179,0	370	3,0	4,8			23/11/85
Gayak	430,7	1180,8	370	2,0	7,6	0,260	0,430	5/6/90
Guingley	465,3	1193,5	326	9,0	11,2	0,800		18/7/84
Guingley	463,5	1191,7	326	3,0	12,6			13/11/85
Harde Yana	439,8	1179,0	375	0,7	24,0	0,030	0,026	23/4/90
Harde Yana	439,8	1179,0	375	2,3	13,6	0,170	0,170	29/4/90
Kahéo	441,7	1168,1	350	3,2	7,3	0,440		25/2/85
Kaodjiga	454,4	1199,0	340	5,5	1,4	3,930		17/10/90
Kaodjiga	454,4	1199,0	340	5,0	1,4	3,520		17/10/90
Kodek	436,2	1180,8	370	1,0	10,5	0,100	0,090	28/4/90
Kodek	436,2	1180,8	370	1,4	10,7	0,130	0,140	12/4/90
Kodek	436,2	1180,8	370	1,0	19,7	0,050	0,058	18/4/90

4.6. Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

4.6.1. Les pompages d'essais : méthodes d'interprétations.

Les essais de pompage qui ont été exécutés pendant la foration avaient essentiellement pour but de déterminer la cote d'installation de la pompe sur les forages. Toutefois, les niveaux dynamiques ont été mesurés durant les phases de descente et de remontée jusqu'au retour au niveau statique initial.

Ces essais ont été conduits suivant la démarche classique des essais à débits constants ou en paliers de débits de 2 à 3 paliers enchainés d'une durée de 2 à 6 heures. Les paramètres hydrauliques (débit, rabattement, débit spécifique et transmissivité) ont été mesurés ou calculés par **SOGREAH** (1991). Les méthodes d'interprétation couramment employées sont la méthode de Theis-Jacob et la méthode de Thiem.

4.6.1.1. Méthode de Theis-Jacob.

Pendant le pompage (descente), l'interprétation des essais s'est faite suivant la méthode d'approximation logarithmique de Theis-Jacob dont la relation simplifiée est la suivante :

$$D = (0,183*Q/T)*\log[(2,25*T*t)/(x^2*S)] \qquad (4.1)$$

Pour un débit constant, on peut écrire :

$$D = (0,183*Q/T)*\log[(2,25*T/x^2*S)+\log t] \qquad (4.2)$$

L'équation (4.2) est de la forme : $Y = a*(\log b + \log x)$ (4.3)
où a et b sont des constantes et x la variable.

A partir de la relation (4.2), on peut tracer un diagramme semi-logarithmique D-logt ou D-log(t/x^2), qui permet de déterminer la transmissivité, (T), et le coefficient

Tableaux 4.1b. - Caractéristiques hydrauliques des ouvrages de captage.

LOCALITE	X (km)	Y (km)	Z (m)	Q (m3/h)	rabat (m)	Q/S (m3/h/m)	T (10-4) (m2/s)	Date
Kossewa	428,9	1186,3	380	0,7	17,7	0,040	0,760	13/4/90
Kossewa	428,9	1186,3	380	0,9	5,0			22/11/85
Kossewa	428,9	1186,3	380	0,7	5,1	0,140	1,300	16/4/90
Kourdaya	461,7	1202,6	323	0,7	16,9	0,040	0,024	17/5/90
Kourdaya	461,7	1202,6	323	0,7	13,3	0,050	0,033	8/5/90
Kourdaya	461,7	1202,6	323	1,4	9,4	0,150	0,510	11/5/90
Louba Louba	461,7	1211,7	318	6,1	7,0	0,870	0,350	7/12/90
Madaka	454,4	1189,9	348	1,0	0,1	7,690		12/5/90
Madaka	454,4	1189,9	348	6,2	0,5			11/5/90
Madide	458,0	1197,2	335	3,5	2,5	1,420	11,000	27/5/90
Madide	458,0	1197,2	335	5,1	2,8	1,850	5,100	26/10/90
Madide	458,0	1197,2	335	4,5	6,8	0,670		25/10/90
Massourdouba	436,2	1188,1	358	1,3	2,9	0,440	6,600	2/4/90
Mayel Guinadji	447,1	1193,5	348	3,5	11,4	0,310		12/10/90
Mayel Guinadji	447,1	1193,5	348	2,4	5,8	0,410	8,300	13/10/90
Meringue	465,3	1199,0	340	3,0	10,2			14/11/85
Mongossi	478,1	1211,7	309	2,3	4,7	0,330		19/6/91
Mororo	458,0	1189,9	331	6,0	17,4	0,210		15/5/91
Nanidjam	445,3	1195,4	348	1,7	7,2	0,240	0,180	20/11/90
Ngaba Mango	448,9	1199,0	330	3,5	1,8	1,940	29,000	16/10/90
Ngaba Mango	448,9	1199,0	330	2,5	1,2	2,190	31,000	15/10/90
Ngarao	448,9	1189,9	340	6,0	1,3	4,720	1,100	19/5/90
Ngarao	448,9	1189,9	340	6,0	1,6	3,770	46,000	21/5/90
Nguerme I	467,1	1220,8	309	1,0	21,6	0,050	0,030	23/5/90
Nguerme II	467,1	1222,7	309	6,7	1,0	6,910	20,000	5/12/90
Ouro Aladji	445,3	1186,3	350	2,8	29,8			20/1/86
Ouro Béba	441,7	1189,9	356	3,0	18,2	0,100		16/5/91
Ouro Kaidal	436,2	1175,3	380	9,0	4,8	0,780		11/5/91
Ouro Said	436,2	1175,3	360	3,1	12,7	0,170		07/5/91
Ouro Said	436,2	1175,3	360	1,3	18,8	0,070		04/5/91
Ouro Yaya	459,9	1191,7	331	5,5	11,2	0,290		15/5/91
Papata	430,7	1191,7	400	0,4	8,8	0,050		19/7/84
Sawao	447,1	1188,1	348	2,0	10,1	0,200	0,130	7/5/90
Sawao	447,1	1188,1	348	4,5	14,7	0,310	0,630	17/5/90
Sawao	447,1	1188,1	348	7,2	0,2			9/5/90
Sindigawo	430,7	1179,0	370	1,0	10,5	0,100	0,080	9/4/90
Tchabaol	465,3	1195,4	326	4,6	1,2	3,800	0,065	12/11/90
Tchabaol	465,3	1195,4	326	2,0	12,5	0,160	25,000	14/11/90
Tchaloudi	438,0	1186,3	360	4,0	10,7	0,380		20/7/84
Tchofnaguel	438,0	1191,7	356	0,7	4,6	0,160	0,084	24/11/90
Yaere Ouro	438,0	1188,1	360	6,2	1,5	2,400		30/5/91
Yaya Soudani	438,0	1191,7	356	5,7	4,2	1,350	1,300	25/11/90
Yolde Tchoukol	454,4	1202,6	341	0,9	12,5	0,070	0,035	2/11/90
Yomkola	434,4	1175,3	388	5,5	12,3	0,300		14/5/91
Zagara	481,7	1235,4	305	0,9	27,9	0,030	0,021	2/1/91

d'emmagasinement, (S), à partir de mesures de D, x et t pour un ou plusieurs débits, (Q), donnés. L'accroissement de D pour un cycle logarithmique du temps est c=dD/1 et la valeur de la transmissivité est :

$$T = 0,183*Q/c \qquad (4.4)$$

T est la transmissivité en m^2/s, Q le débit de pompage en m^3/s et, c, le rabattement en mètres pour un cycle log du temps.

Dans la pratique, le pompage d'essai est effectué dans le forage et les rabattements sont mesurés dans un ou plusieurs piézomètres placés à des distances, (x), non loin du forage. **Pour l'ensemble des forages inventoriés, le coefficient d'emmagasinement n'a pas été calculé** car, les mesures de niveau étaient effectuées dans le forage d'essai lui-même, en l'absence de piézomètre de contrôle. Les paramètres mesurés sont consignés dans les tableaux 4.1a et 4.1b.

4.6.1.2. Méthode de Thiem.

Par analogie au principe de la superposition des écoulements, après l'arrêt d'un pompage à débit constant, Q, on peut étudier la courbe de remontée en supposant la poursuite du pompage à débit, Q, et la mise en route en même temps, dans le même forage, d'une injection d'eau à débit, -Q. Dans ce cas, le rabattement initialement induit va décroitre, et, à partir du temps, t, écoulé depuis le début de pompage et son arrêt, on peut calculer le rabattement résiduel par la relation :

$$D' = (0,183*Q/T)*\log(t/t') \qquad (4.5)$$

Cette relation permet de calculer graphiquement dans un cycle logarithmique du temps, à partir de la droite de remontée D'-log(t/t'), la transmissivité, T :

$$T = 0,183*Q/i \qquad (4.6)$$

i est l'accroissement du rabattement résiduel dans un cycle logarithmique du temps.

4.6.1.3. Conclusion.

Au Cameroun comme au Burkina-Faso, en Côte d'Ivoire, au Gabon, au Mali, au Niger, au Nigeria, au Sénégal ... **les méthodes de Theis ou de Jacob** ont été très souvent utilisées pour interpréter les pompages d'essai ou plus précisement les essais de puits réalisés dans le cadre de nombreux projets d'hydraulique. Ces méthodes **ont été adaptées soit aux aquifères de socle** (milieu fissuré et discontinu), **soit aux aquifères sédimentaires** (nappe libre, nappe captive, nappe semi-captive) dans un milieu généralement anisotrope.

Nous remarquons que, **les conditions de réalisation de ces essais de pompage ne correspondent pas toujours aux limites de validité des méthodes employées** car, les méthodes de Theis ou de Jacob qui sont **spécifiques aux nappes captives**, sont généralement appliquées dans des domaines qui sont différents de leurs cadres d'utilisations réelles :

- les essais sont de très courtes durées (2 heures en moyenne);
- les rabattements ne sont pas mesurés dans un piézomètre;
- tous les forages n'atteignent pas le mur de l'aquifère (forage imparfait);
- l'aquifère est hétérogène.

Les transmissivités obtenues après analyse des courbes de rabattement ne sont donc représentative que d'une portion très restreinte de l'aquifère considéré. Nonobstant ces lacunes, ces essais représentent une masse considérable d'informations. **Il est cependant indispensable pour une meilleure utilisation**

pratique, que ces données soient complétées au cours des prochaines campagnes de forage par :

- des essais de longue durée (72 heures au moins) pour étalonner la distribution des transmissivités, déterminer les coefficients d'emmagasinement et identifier les conditions aux limites;

- une ou deux méthodes d'interprétation différentes pour permettre de comparer les résultats obtenus, de discuter la validité des différentes méthodes et rendre plus efficace le choix de l'une ou l'autre d'entre elles.

4.6.2. Les débits de pompage des forages.

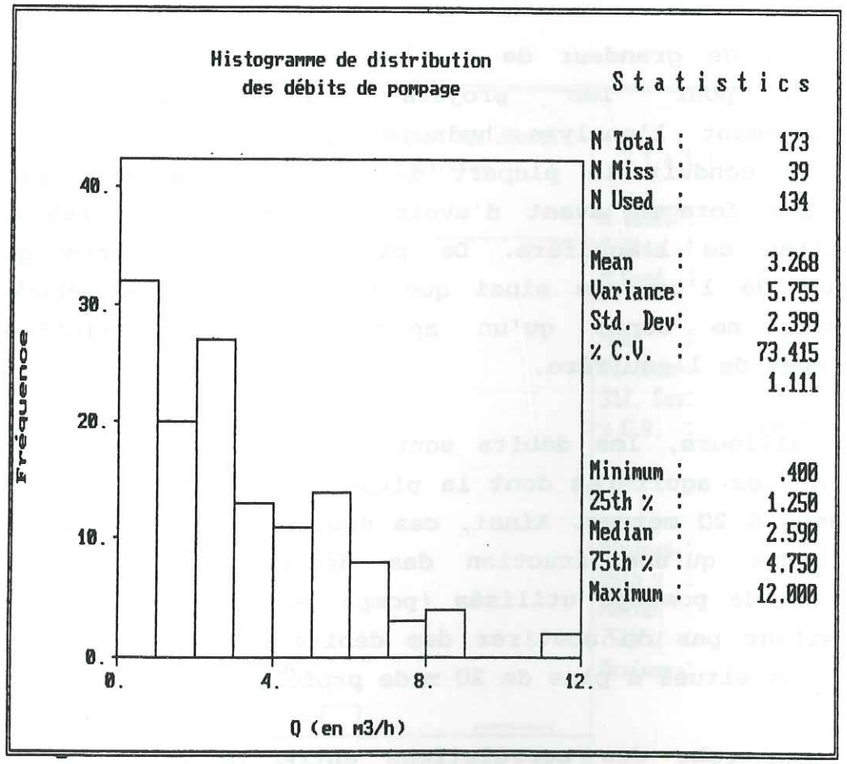


Figure 4.9.

La figure (4.9) montre la distribution des débits dans le

périmètre concerné par nos études. Le débit minimum est de 0,4 et le maximum est de 12 m^3/h. La moyenne est de 3 m^3/h et plus de 75 % des ouvrages ont des débits inférieurs à 4,5 m^3/h. Les débits < 1 m^3/h concernent surtout les forages dont les profondeurs sont supérieures à 45 mètres. Le coefficient de variation est supérieur à 200 %, ce qui temoigne de la variabilité de ce paramètre dans le secteur considéré. Les meilleurs débits (5 à 8 m^3/h) proviennent des zones captant les niveaux alluviaux superficiels. Dans l'ensemble, les débits obtenus sont très faibles.

En dehors du champ de captage de la Société Nationale des Eaux du Cameroun (SNEC) à Maroua où 3500 m^3/j sont exploités dans 4 forages pour l'alimentation en eau potable, aucun forage à grand débit ne capte la nappe du Quaternaire.

L'ordre de grandeur de 1 m^3/h des débits exploitables recherchés pour les projets d'hydraulique, limite considérablement l'analyse hydrogéologique. En effet, cet objectif a conduit la plupart des sociétés de foration à arrêter les forages avant d'avoir exploré la totalité des possibilités de l'aquifère. De plus, les caractéristiques techniques de l'ouvrage ainsi que son développement souvent insuffisant ne donne qu'un aperçu des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère.

Par ailleurs, les débits sont obtenus dans les forages exploitant les aquifères dont la plupart des profondeurs sont supérieures à 20 mètres. Ainsi, ces débits ne représentent le plus souvent qu'une fraction des débits réels car, les dispositifs de pompage utilisés (pompe de diamètre 4 pouces) ne permettent pas de soutirer des débits élevés lorsque les niveaux sont situés à plus de 20 m de profondeur.

La recherche des corrélations entre la profondeur du forage d'une part, l'épaisseur du recouvrement d'autre part et les débits pompés a montré que contrairement à ce que pense Detay (1987), l'épaisseur des terrains ne règle pas les débits

disponibles. C'est la nature des dépôts captés qui joue ce rôle.

Le captage des niveaux d'altération, même s'il fait augmenter le taux de réussite des forages, réduit la proportion des forts débits du fait de leurs perméabilités en général plus faibles.

4.6.3. Les débits spécifiques et les transmissivités.

4.6.3.1. Répartition géographique des paramètres.

i) - Les débits spécifiques. Le débit spécifique, noté Q/s, exprimé en $m^3/h/m$, est le débit pompé, Q, rapporté au rabattement, s, dans les conditions d'essais de puits définies.

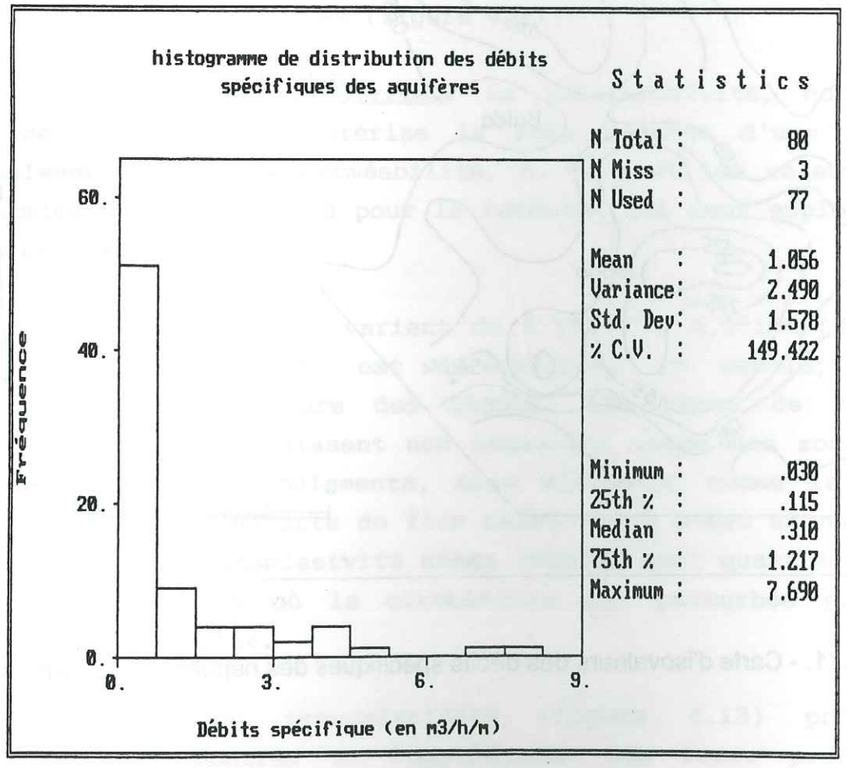


Figure 4.10.

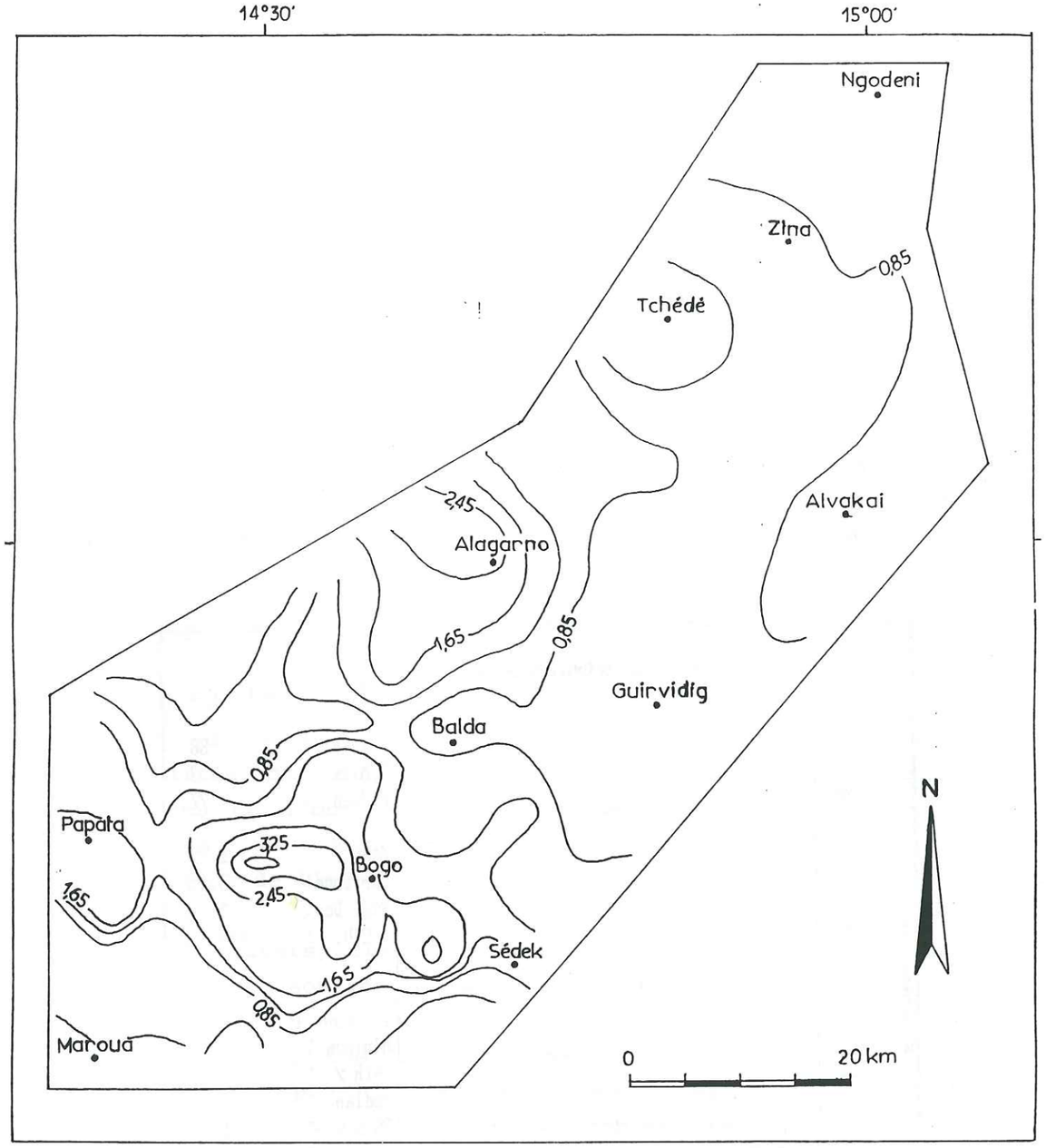


Figure 4.11. - Carte d'isovaleurs des débits spécifiques des nappes du Quaternaire.

Pour une moyenne de 3 heures de pompage, 50 % des ouvrages ont un débit spécifique inférieur à 0,2 $m^3/h/m$ et près de 75 % un Q/s inférieur à 1,2 $m^3/h/m$. La valeur moyenne est également très faible; environ 1,05 $m^3/h/m$ (figure 4.10). Les ouvrages dont les débits spécifiques sont supérieurs à 1 $m^3/h/m$ offrent des débits appréciables. Cependant, certains forages présentant de forts débits, ont des rabattement si élevés que les débits spécifiques qui en résultent sont très faibles.

L'étude de la répartition des valeurs de débits spécifiques confirme dans l'ensemble que, les niveaux d'altérites argileuses ou d'argiles sableuses présentent de faibles productivités. Les forages profonds de Alagarno présentent des débits spécifiques de l'ordre de 3 $m^3/h/m$, ce qui traduit une bonne productivité comme le témoigne les valeurs de transmissivités (figure 4.11).

ii) - <u>Les transmissivités</u>. La transmissivité, noté T, exprimée en m^2/s, caractérise la zone saturée d'une nappe d'épaisseur, H, et de perméabilité, K. Ce sont les valeurs de transmissivités calculées pour la remontée qui sont exploitées dans ce travail.

Les transmissivités varient de $2,1*10^{-6}$ à $4,6*10^{-3}$ (figure 4.12). La distribution est irrégulière, et semble, liée directement à la nature des dépôts. Les zones de fortes transmissivités apparaissent non seulement comme des zones de concentration des écoulements, mais également comme le lieu priviligié des transferts de flux entre cours d'eau et nappes. Les valeurs de transmissivité assez faibles sont quant à elles liées à des zones où la circulation est perturbée par la présence des argiles.

La carte de transmissivité (figure 4.13) présente l'avantage de montrer la localisation des zones profondes comme Alagarno, potentiellement favorables pour l'implantation

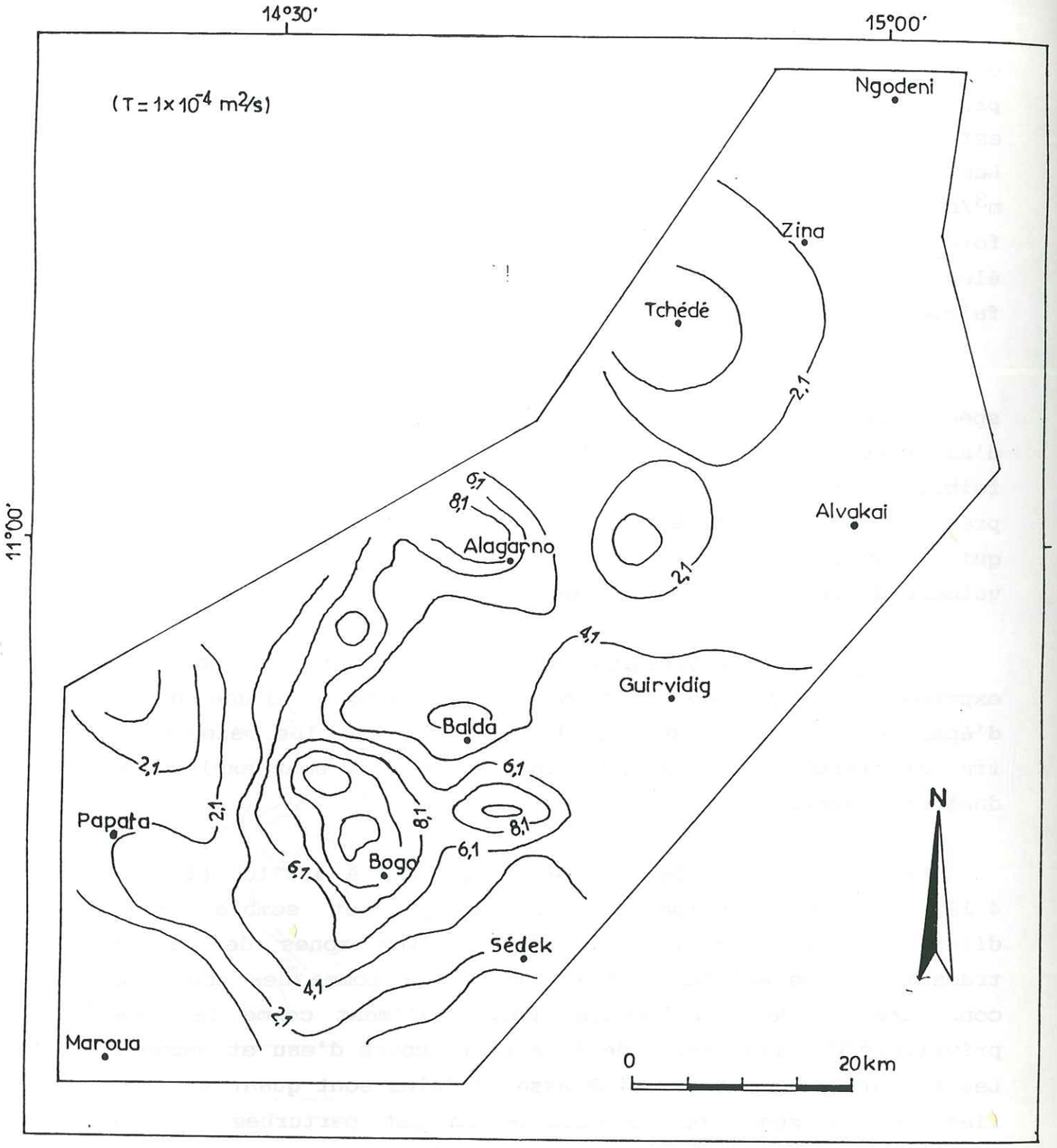


Figure 4.13. - Carte d'isovaleurs des transmissivités (et sa valeur en 10^{-4} m^2/s) des aquifères du Quaternaire.

des forages, ce qui signifie que dans le piémont où on a des données suffisamment bien réparties, la figure 4.13 est un outil indispensable pour la recherche de site de forage les plus productifs.

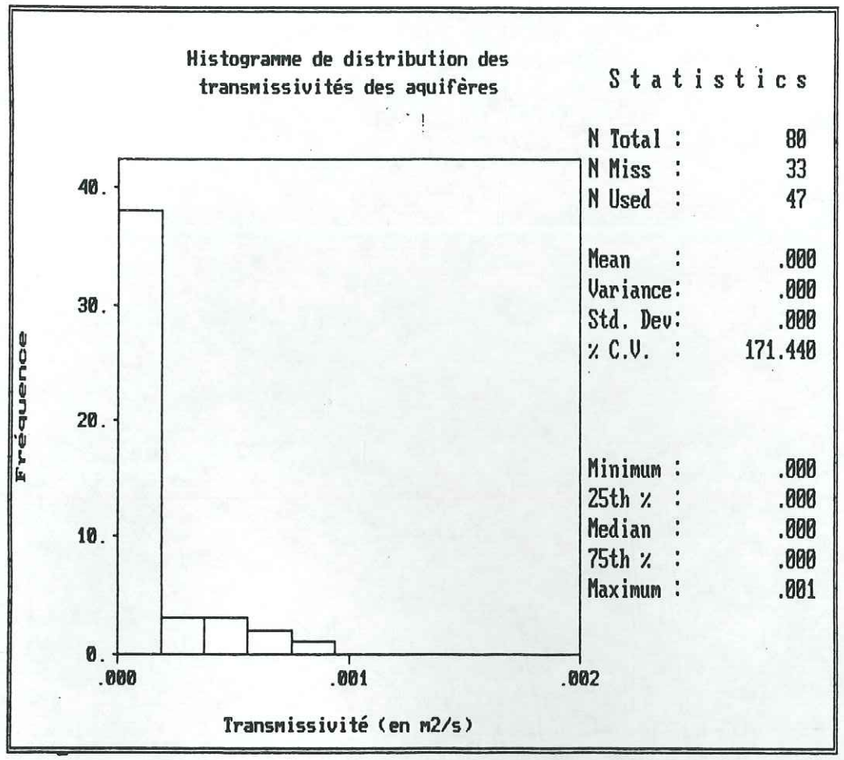


Figure 4.12.

L'analyse des cartes de transmissivité et de débits spécifiques fait apparaître qu'à l'échelle de la zone étudiée, la répartition de la transmissivité suit relativement celle des débits spécifiques.

4.6.3.2. Corrélation transmissivité/débit spécifique.

Le débit spécifique étant fortement influencé par les procédures d'essais de pompage, nous avons fait des corrélations avec les transmissivités. Le report des 54

couples de valeurs disponibles sur un graphe en coordonnées arithmétiques, a montré qu'à l'exception de quelques points abérrants, la dispersion des points augmentait avec de fortes valeurs de Q/s et de T (figure 4.14). En raison de la disproportion qu'il y a entre les mesures, nous avons transformer l'échelle arithmétique en échelle logarithmique. La figure A4.1 obtenue se trouve en annexe 2.

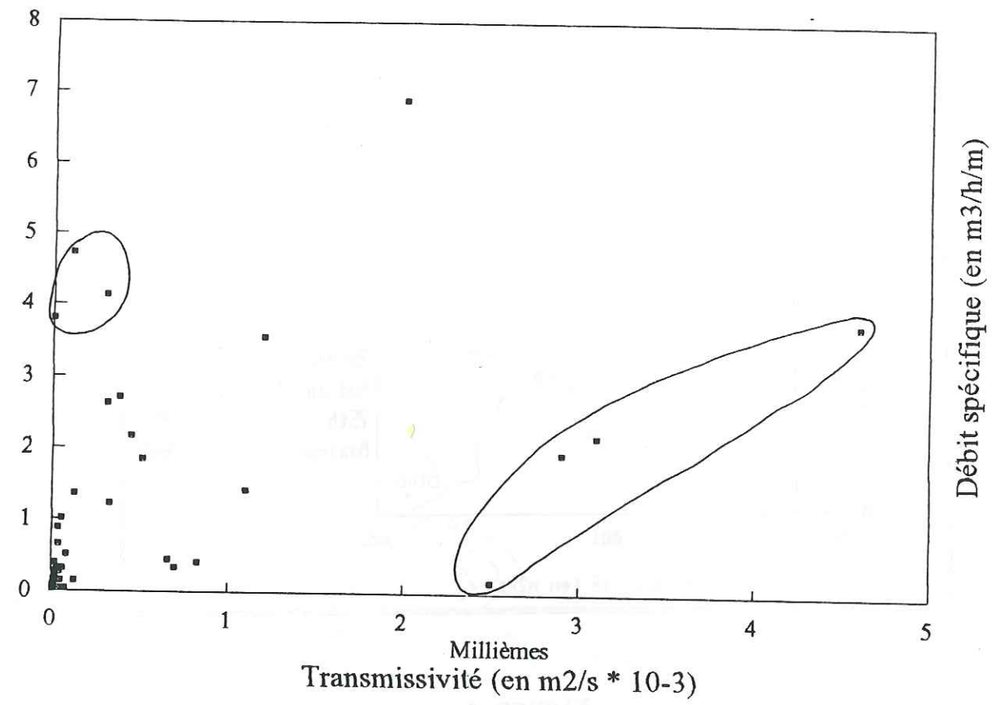


Figure 4.14.

Sur la figure 4.14, les points encadrés qui se détachent du lot peuvent avoir plusieurs explications : les débits spécifiques très faibles par rapport aux transmissivités sont liés soit aux pertes de charge, souvent très importantes en début de pompage, dans les forages de faibles diamètres, captant de surcroît les niveaux altérés ou argilo-sableux, soit à une assez bonne condition d'alimentation.

Si l'on fait abstraction des ouvrages soumis aux conditions évoquées, on obtient pour 47 couples de points restants, un coefficient de corrélation de l'ordre 0,70 et les droites de dépendance suivantes :

$$Q/s = 2566*T + 0,18 \qquad (4.7)$$

$$T = 0,000267*Q/s + 0,000016 \qquad (4.8)$$

L'existence d'un coefficient de corrélation hautement significatif permet d'extrapoler et d'estimer par défaut, les transmissivités en certains points en procédant simplement à une régression linéaire de T en Q/s. Cependant, cet ajustement doit être manipulé avec prudence en raison de la lithologie très complexe des aquifères considérés et de la faiblesse de la population étudiée.

4.6.4. Détermination de la perméabilité.

Les essais de débit peuvent également permettre de déterminer la perméabilité des formations aquifères. Il existe plusieurs méthodes de détermination :

- les méthodes de terrain. La plus utilisée est l'essai Lefranc. Il est réalisé sur un horizon bien délimité dans un forage, soit par injection, soit par pompage;

- les méthodes de laboratoire. Elles regroupent l'analyse granulométrique, les mesures à l'aide des perméamètres à charge constante et à charge variable.

En l'absence d'application de l'une ou l'autre de ces méthodes, nous avons déterminé approximativement la perméabilité, (K), du terrain par le biais des transmissivités, (T), en considérant d'une part l'épaisseur de l'aquifère, (h), et d'autre part la longueur crépinée, (Lc).

Tableau 4.2. - Valeurs de perméabilité des aquifères du Quaternaire.

Localité	T (10-4 m2/s)	h (m)	Lc (m)	K=T/h (10-6 m/s)	K=T/Lc (10-6 m/s)
Adya		7,9	3,7		
Alagarno	3,800	50,2		7,57	
Alagarno Gouna	3,000	45,1	11,5	6,65	26,09
Andirni	0,150	62,8	20,9	0,24	0,72
Assideo	0,350	16,7	8,5	2,10	4,12
Balaza Louane	4,500	21,7	11,5	20,74	39,13
Balaza Louane	0,130	23,5		0,55	
Balda	0,370	20,9	11,4	1,77	3,25
Balda	0,180	28,3	6,6	0,64	2,73
Balda	0,100	18,2	14,4	0,55	0,69
Balda	0,082	30,2	17,2	0,27	0,48
Balda	3,100	26,7	11,5	11,61	26,96
Diguir	12,000	17,0	11,5	70,59	104,35
Diguir	0,074	32,2	14,2	0,23	0,52
Djarengol		37,3	8,4		
Djarengol	0,110	30,8	8,5	0,36	1,29
Djarengol	0,810	23,2	8,6	3,49	9,42
Djiddel		19,6	16,1		
Djiddel	3,300	22,0	17,8	15,00	18,54
Djinabalam	0,180	22,3	20,7	0,81	0,87
Djinabalam	0,400	19,4	12,2	2,06	3,28
Fadare Abbawa	0,520	28,1	17,3	1,85	3,01
Fadare Abbawa	0,350	33,2	20,1	1,05	1,74
Gada Bouwol	0,041	33,2	14,3	0,12	0,29
Gada Louggol	7,000	19,0	17,3	36,84	40,46
Gayak	0,430	11,8	11,5	3,64	3,74
Harde Yana	0,026	51,5	14,3	0,05	0,18
Harde Yana	0,170	35,7	12,2	0,48	1,39
Kaodjiga		28,9	17,2		
Kaodjiga		33,7	17,3		
Kodek	0,090	24,6	11,5	0,37	0,78
Kodek	0,140	30,5	14,3	0,46	0,98
Kodek	0,058	28,0	14,3	0,21	0,41
Kossewa	0,760	29,0	14,3	2,62	5,31
Kossewa	1,300	27,6	14,3	4,71	9,09
Kourdaya	0,024	29,0	29,5	0,08	0,08
Kourdaya	0,033	26,9	16,1	0,12	0,20
Kourdaya	0,510	18,5	12,4	2,76	4,11
Louba Louba	0,350	34,3	17,3	1,02	2,02
Madaka		14,0	9,5		
Madaka		14,5	11,5		
Madidé	11,000	25,3	11,5	43,48	95,65
Madidé	5,100	31,4	11,5	16,24	44,35
Madidé		32,5	11,5		
Massourdouba	6,600	8,2	14,3	80,49	46,15
Mayel Guinadji	8,300	33,2		25,00	
Nanidjam	0,180	29,4	17,3	0,61	1,04
Ngaba Mango	29,000	12,0	15,2	241,67	190,79
Ngaba Mango	31,000	29,4	17,3	105,44	179,19
Ngarao	1,100	27,6	17,2	3,99	6,40
Ngarao	46,000	19,8	14,3	232,32	321,68
Nguerme I	0,030	40,4	10,3	0,07	0,29
Nguerme II	20,000	51,9	17,2	38,54	116,28
Sawao	0,130	31,5	14,3	0,41	0,91
Sawao	0,630	39,0	9,5	1,62	6,63
Sawao		28,6	14,4		
Sindigawo	0,080	24,0	11,5	0,33	0,70
Tchabaol	0,065	27,6	14,3	0,24	0,45
Tchabaol	25,000	31,4	14,3	79,62	174,83
Tchofnaguel	0,084	26,1	17,2	0,32	0,49
Yaya Soudani	1,300	47,9	11,5	2,71	11,30
Yolde Tchoukol	0,035	25,5	11,5	0,14	0,30
Zagara	0,021	80,7	19,0	0,03	0,11

Dans les deux cas, la perméabilité a respectivement pour expression :

$$K = T/h \qquad (4.9)$$

$$K = T/Lc \qquad (4.10)$$

K a les dimensions d'une vitesse $[LT^{-1}]$ et s'exprime en m/s. Les résultats obtenus selon les deux méthodes sont groupés dans le tableau 4.2.

Les différences observées sont surtout dues aux valeurs élevées de h par rapport à la longueur crépinée, Lc. Ceci peut traduire une mise en charge locale de la nappe qui entraîne une remontée du niveau d'eau dans le forage.

En comparant les valeurs de perméabilités obtenues et les débits de pompage que les forages donnent, on peut admettre que les résultats obtenus par la deuxième méthode sont plus proches de la réalité que ceux de la première méthode. Les variations sont peu importantes ($1*10^{-3}$ à $1*10^{-7}$). Toutefois, leur fiabilité reste conditionnée par celle de la transmissivité.

4.7. Conclusion.

Dans le bassin du piémont, **la zone altérée n'est qu'une prolongation en profondeur de l'aquifère alluvial.** Les zones aquifères qui accompagnent les recouvrements alluviaux sont en général plus productives que les couches d'altérites argileuses.

Le mur imperméable des niveaux aquifères profonds des Yaérés est encore mal connu et par conséquent, les données sur leurs géométries et sur leurs capacités d'emmagasinement sont incomplètes.

La présence d'une couche d'argile entre les niveaux aquifères superficiel et profond en aval du cordon n'est pas négligeable au point de traiter les systèmes aquifères du Quaternaire comme une monocouche dont la piézométrie est homogène. Cette considération qui peut se justifier à l'échelle du bassin hydrogéologique du Piémont, ne l'est plus à l'échelle du bassin hydrogéologique des Yaérés dans la mesure où la chimie des eaux et l'hydrologie isotopique se revèlent très hétérogènes d'un niveau aquifère à un autre.

Chapitre 5. CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES.

5.1. Introduction.
5.2. Les paramètres physico-chimiques.
5.3. Représentation graphique et Classification des eaux souterraines.
5.4. Importance des éléments majeurs.
5.5. Le rôle de l'argile et l'échange de bases entre l'eau souterraine et le milieu aquifère.
5.6. Conclusion.

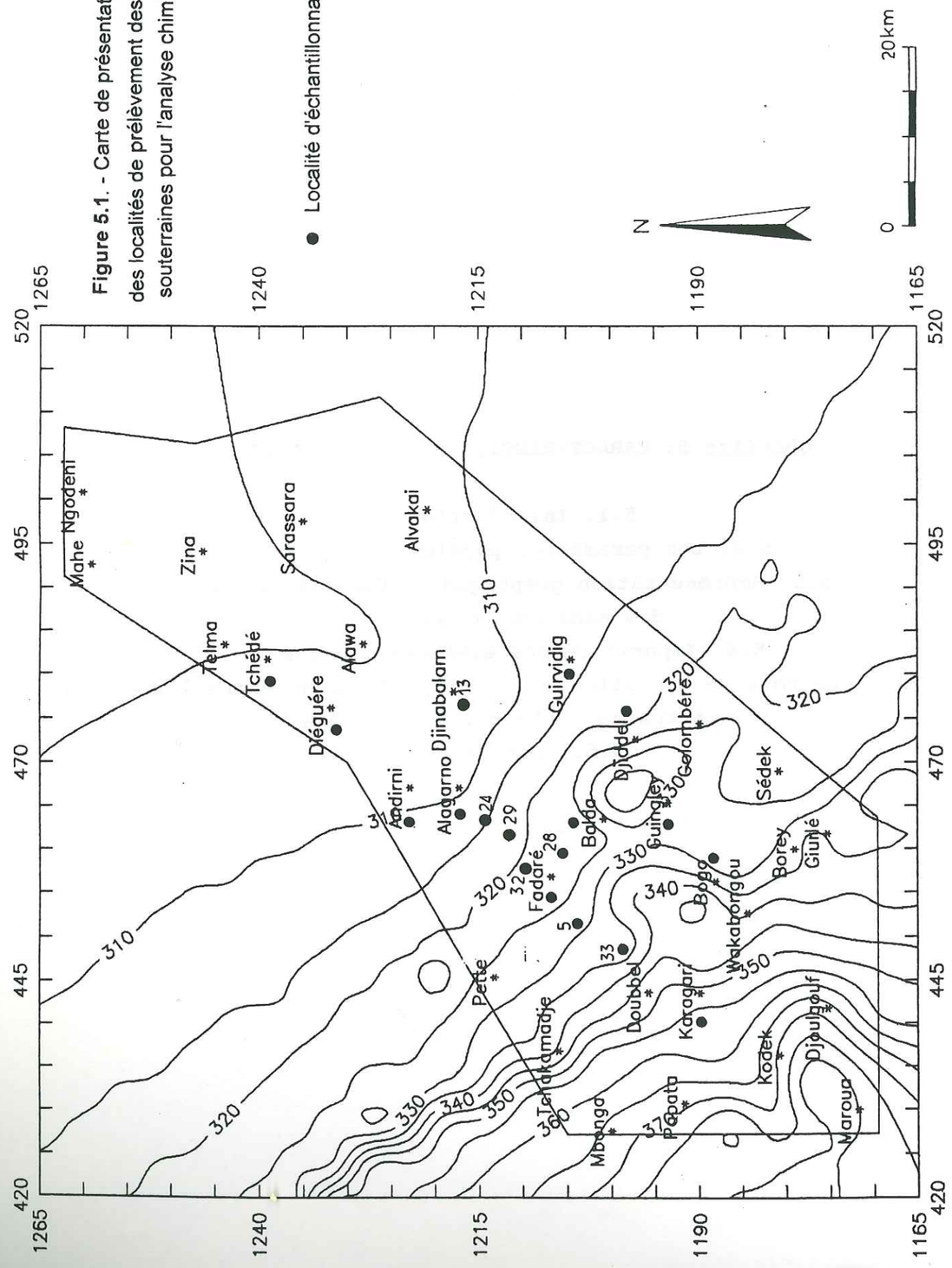


Figure 5.1. - Carte de présentation des localités de prélèvement des eaux souterraines pour l'analyse chimique.

● Localité d'échantillonnage.

5.1. Introduction.

Les prélèvements pour analyses chimiques des eaux souterraines du périmètre étudié ont été éffectués dans 16 forages et 19 puits (figure 5.1). Les mesures in situ ont concerné les paramètres physico-chimiques suivants : le pH, la température et la conductivité. Ces paramètres ont été mesurés à l'aide des appareils portatifs de marque WTW (Wissenschaftlich Technische Werkstätten). L'interprétation des paramètres physico-chimiques prend en compte non seulement les mesures de terrain, mais également les données de l'inventaire des puits et forages (tableaux A5.1a et A5.1b en annexe 3).

Les dosages au Laboratoire ont porté sur les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{--}), les nitrates (NO_3^-), les bicarbonates (HCO_3^-), les alcalins (Na^+ et K^+), et les alcalino-terreux (Ca^{++} et Mg^{++}). Les caractéristiques biologiques n'ont pas été abordées.

Les analyses de laboratoire ont été effectuées dans les Laboratoires de l'AIEA, de l'ORSTOM et de l'IRGM. Les analyses qui ont été réalisées par l'équipe d'hydrochimie du Centre de Recherches Hydrologiques (CRH/IRGM) au Centre National des Sols de Kolbison à Yaoundé ne sont pas prises en compte car, elles sont incomplètes et ne permettent pas d'apprécier la balance ionique ni de faire des comparaisons entre éléments. Les résultats d'analyses sont consignés dans les tableaux A5.2a, A5.2b et A5.2c en annexe 3.

Toutes les données recueillies ont été stockées dans des ordinateurs compatibles IBM sur fichier LOTUS 123 nommé "Chimie de l'eau". Ce fichier a été exploité pour le calcul de la moyenne, de l'écart-type, du coefficient de variation, pour la construction des cartes isovales de pH, de température, de conductivité et pour la recherche des corrélations entre

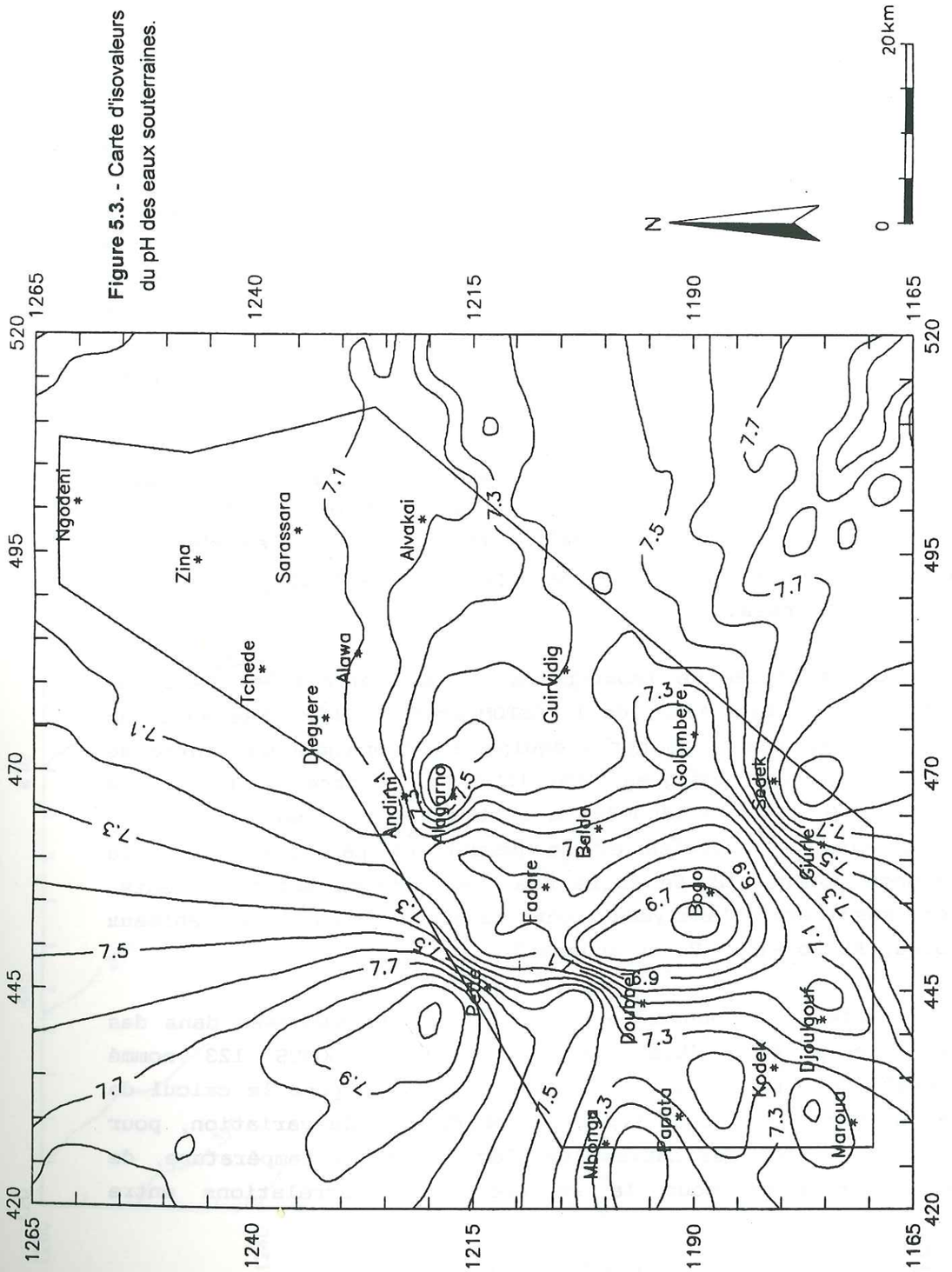


Figure 5.3. - Carte d'isovaleurs du pH des eaux souterraines.

paramètres. La classification des types d'eau a été faite à partir de l'analyse des élements majeurs et des diagrammes de Piper et de Schoeller-Berkaloff.

5.2. Les paramètres physico-chimiques.

5.2.1. Le pH.

L'analyse des 111 mesures de pH des eaux souterraines du secteur étudié montre que près de 75 % des valeurs sont situées entre 6 et 7,5. Le pH minimum est de 6, le maximum 8,9 et la moyenne est d'environ 7,2 (figure 5.2).

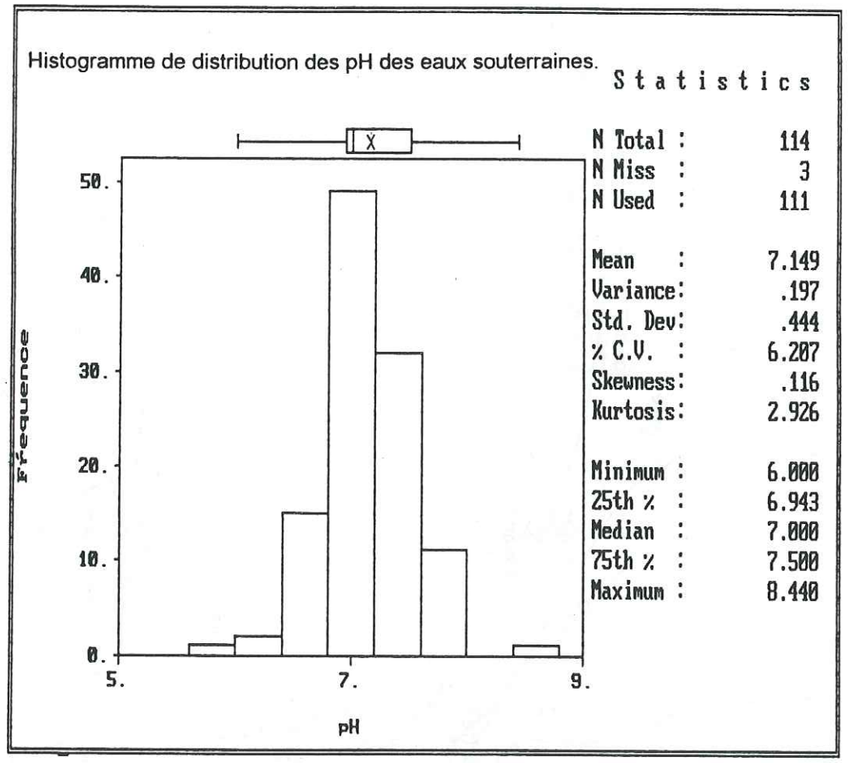


Figure 5.2.

Le domaine des pH < 7 est localisé et centré dans le piémont, à Bogo. Ce domaine est encadré de part et d'autre par des zones de pH > 7 (figure 5.3).

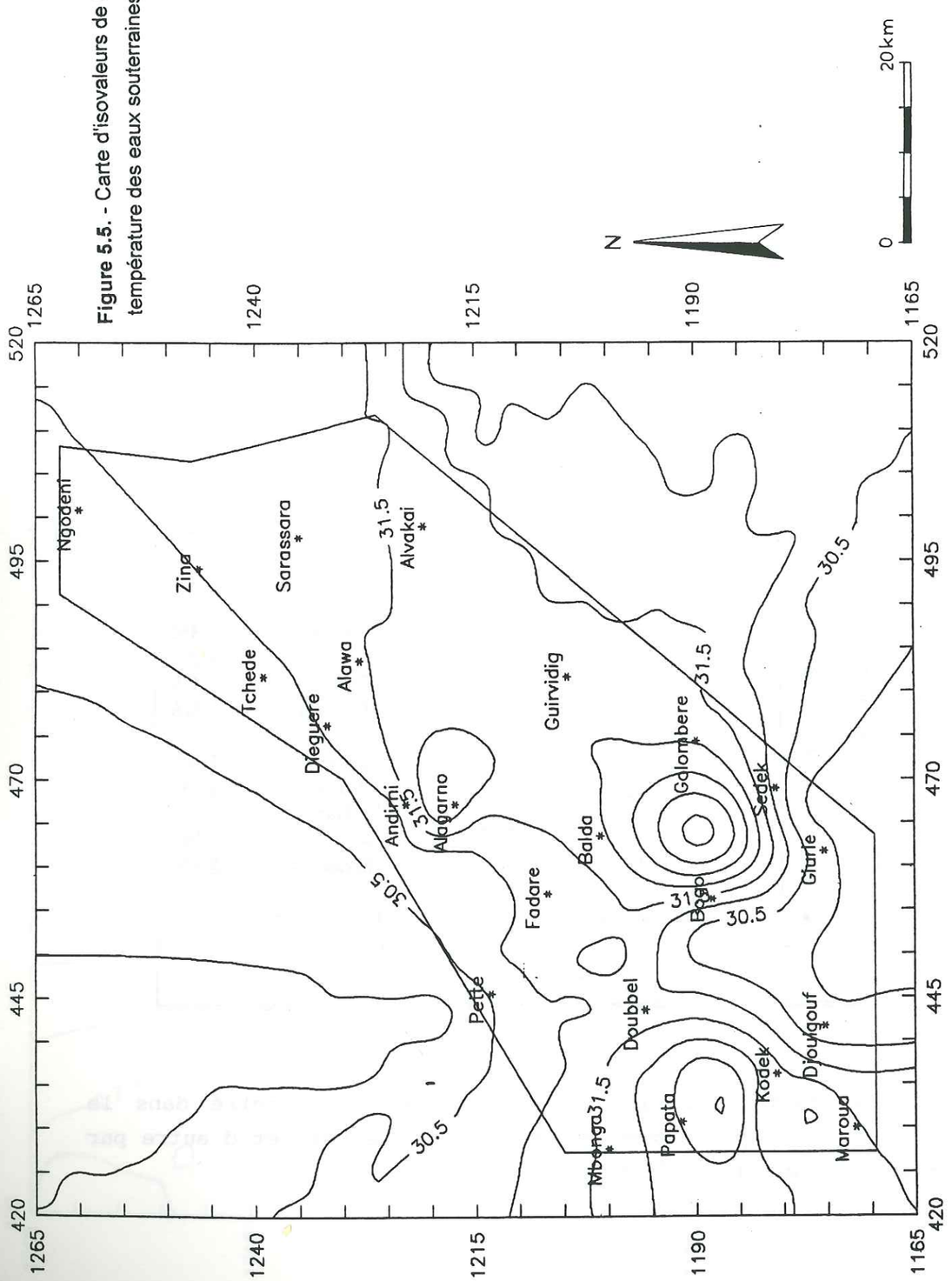


Figure 5.5. - Carte d'isovaleurs de la température des eaux souterraines.

5.2.2. La température.

Pendant nos campagnes de terrain, nous avons procédé à la mesure de température dans une cuvette à échantillon d'une capacité de 10 litres. Les résultats ont été enregistrés avec une précision de 0,1 °C.

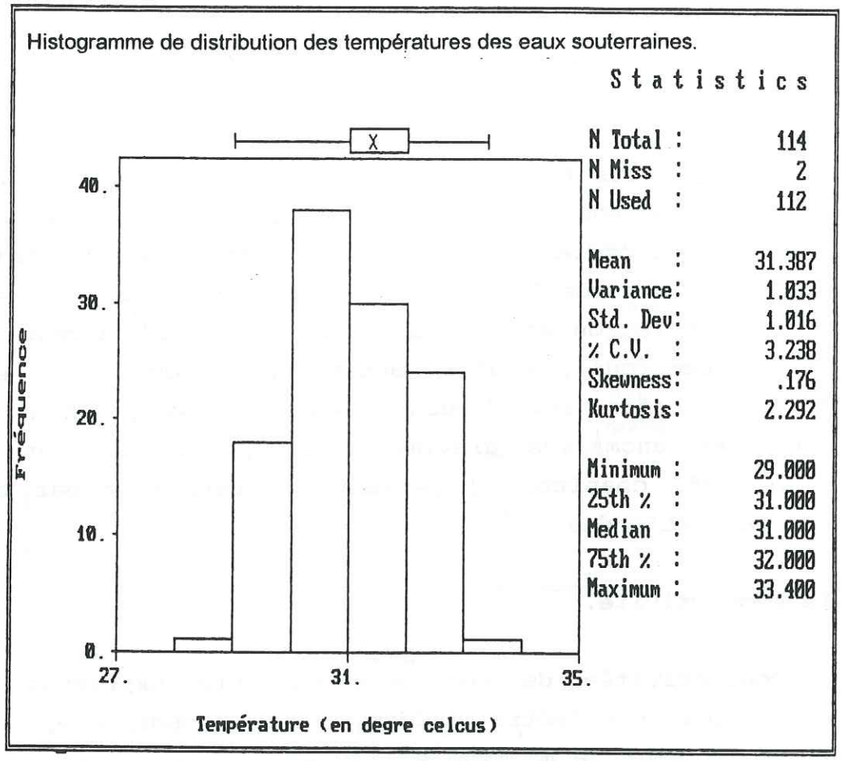


Figure 5.4.

La figure 5.4. montre la distribution des valeurs de température. Elles sont toutes concentrées entre 29° et 33°C, avec une moyenne de 31,5°C. La courbe isovaleur de température, 31,5 °C, se répartit dans l'ensemble de la région. En dehors de l'axe Maroua-Papata et du secteur Bogo-Golombéré-Guirlé, il n'existe pas de température abérrante par rapport à l'ensemble de la nappe. On peut affirmer que la nappe constitue un ensemble homogène du point de vue thermique (figure 5.5).

Dans la plupart des régions sahéliennes (Burkina-Faso, Mali, Niger, Nigéria, Sénégal, Tchad...), à environ moins 30 mètres de profondeur, la température des eaux souterraines est à peu près égale à la température moyenne de l'air. Notre zone d'étude qui se rattache à la zone semi-aride échappe quelque peu à la règle. La température moyenne de l'air est comprise entre 27 et 28 °C : elle présente des écarts par rapport à la température des eaux souterraines, concentrée entre 29 °C et 33 °C.

A l'exception des niveaux d'eau supérieurs à -40 m situés dans l'axe Alagarno-Andirni, la moyenne des niveaux d'eau sous le sol est de l'ordre de -20 m. Il est donc difficile d'associer cette augmentation de température au gradient géothermique. La région étudiée appartient au prolongement de la "ligne du Cameroun", couloir actuellement mobile. Il est probable que l'accroissement de température soit lié à ce couloir où les anomalies gravimétriques présentées sur la figure 1.10 (cf. chapitre 1) peuvent s'interpréter par des intrusions peu profondes.

5.2.3. La conductivité.

Les conductivités de nos eaux ont été exprimées en microsiemens par centimètre (µS/cm). Elles sont comprises entre 110 µS/cm pour le minimum et 840 µS/cm pour le maximum. Moins de 25 % des points d'eau ont des conductivités supérieures à 500 µS/cm. La moyenne se situe autour de de 387 µs/cm (Figure 5.6). Dans l'ensemble, les eaux sont peu minéralisées.

Les faibles valeurs s'observent autour de Bogo et de Fadaré. La zone de faibles conductivités de Bogo, coïncide avec l'axe d'alimentation des nappes superficielles à partir des eaux du Mayo Tsanaga (cf. figure 4.7). **Celà suggère un apport extérieur à partir des cours d'eau qui sont généralement peu minéralisés.**

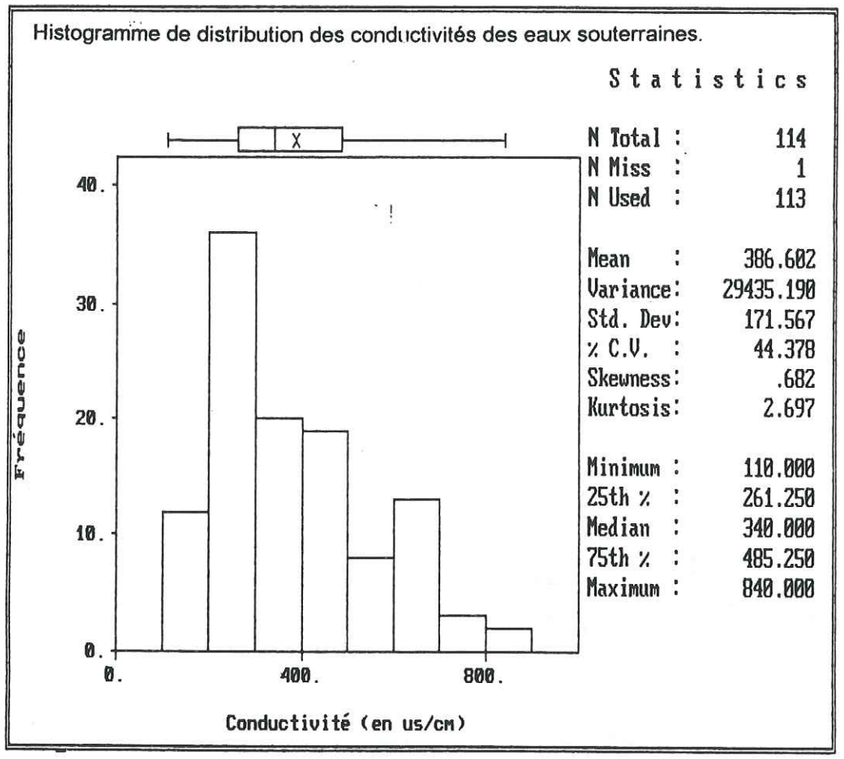
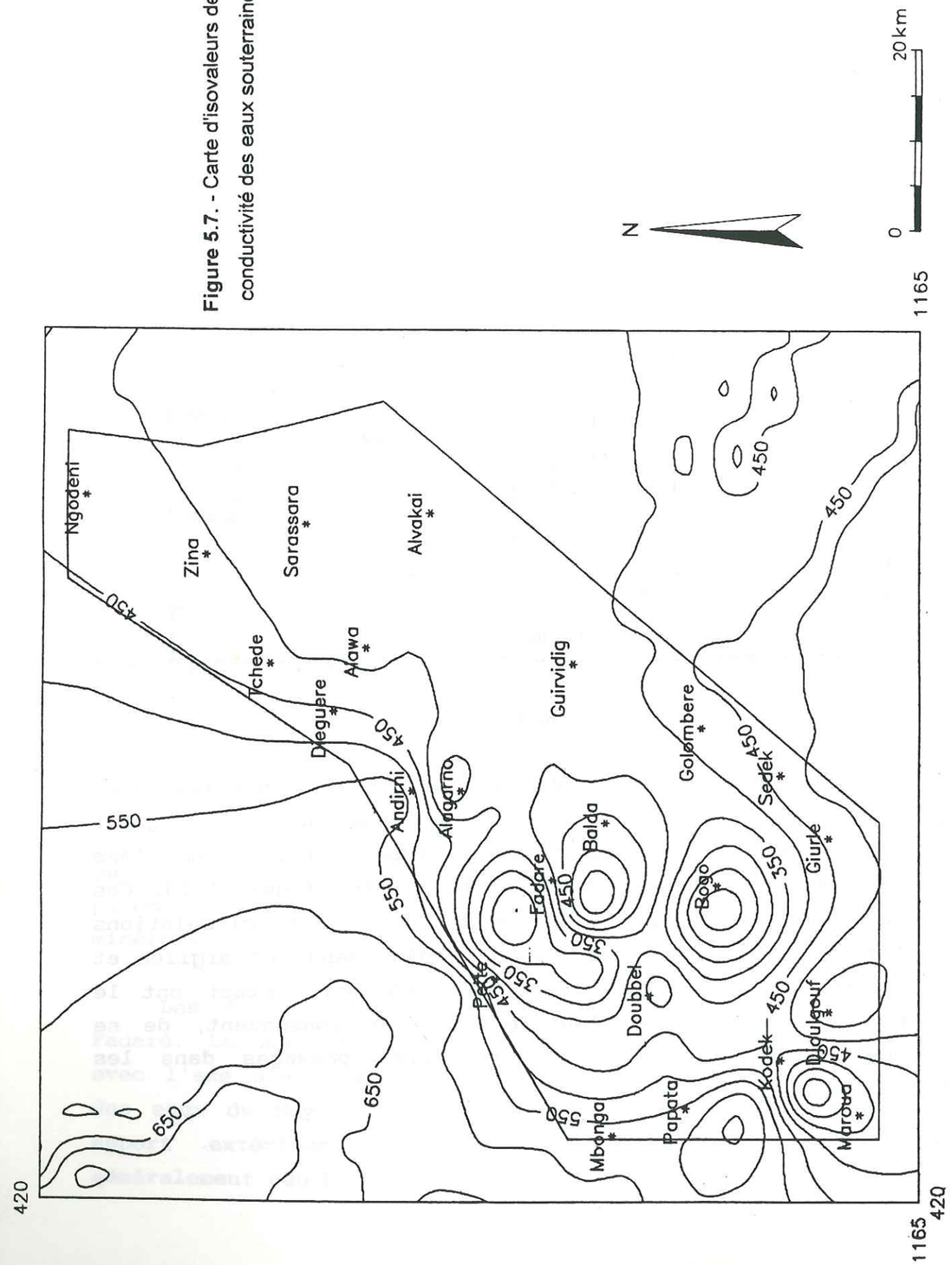


Figure 5.6.

En dehors de Bogo, on observe des fortes conductivités de part et d'autre dans toutes les directions. Elles atteignent leur maximum dans les altérites argileuses situées dans l'axe Maroua-Mbonga et dans le domaine des Yaérés (figure 5.7). Ces fortes valeurs sont probablement liées aux circulations souterraines qui sont relativement lentes dans les argiles et les altérites. En effet, les substances en contact ont le temps de se mettre en équilibre et par conséquent, de se charger en sels dissous pendant leurs passages dans les matériaux encaissants.

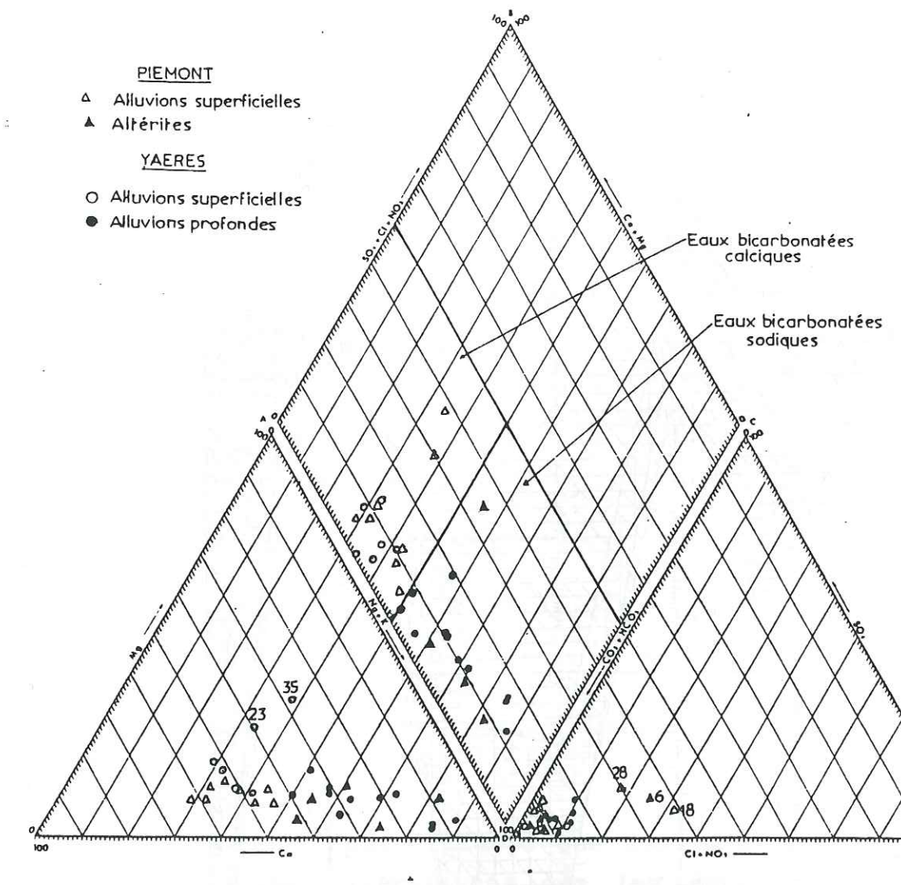
Figure 5.7. - Carte d'isovaleurs de la conductivité des eaux souterraines.



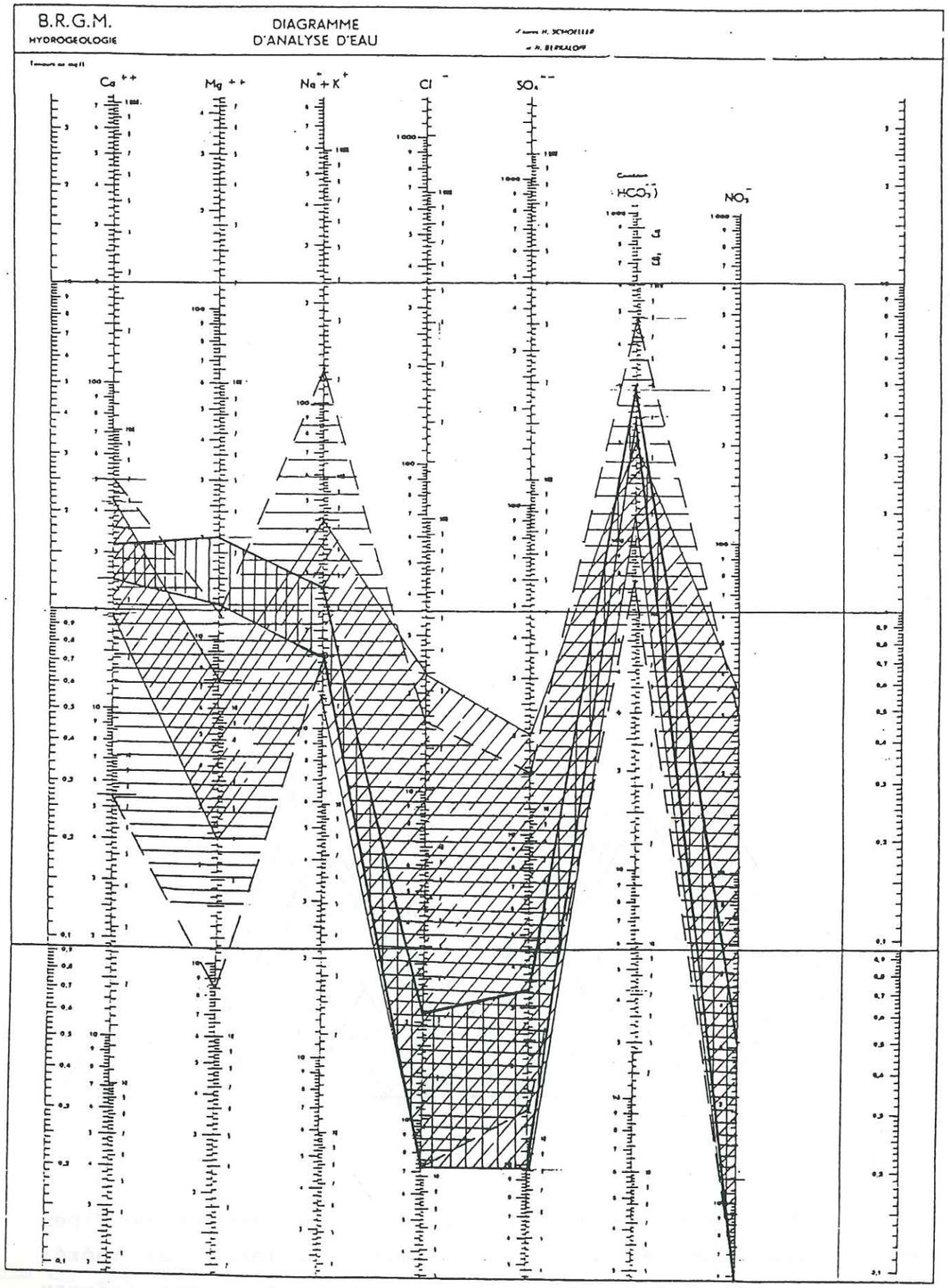
5.3. Représentation graphique et Classification des eaux souterraines.

5.3.1. Représentation graphique des analyses.

i) - <u>Diagramme de Piper</u> (figure 5.8).



Nos analyses ont été portées Dans le diagramme de Piper en fonction des bassins hydrogéologiques (Piémont et Yaéré) d'une part et des réservoirs aquifères d'autre part (niveau superficiel, niveau profond). Dans le triangle des cations, à l'exception des eaux de Guirvidig (n° 23) et de Tchédé (n° 35)



Domaine des eaux bicarbonatées calciques.

Domaine des eaux bicarbonatées sodiques.

Domaine des eaux bicarbonatées calciques, magnésiennes et sodiques.

Figure 5.9. - Diagramme Schoeller-Berkaloff de synthèse des analyses chimiques des eaux souterraines.

qui sont caractérisées par une augmentation de la concentration en magnésium, tous les autres échantillons évoluent vers le pôle calcique ou sodique.

Dans le triangle des anions, toutes les eaux tendent vers le pôle bicarbonaté. Cependant, trois points qui témoignent d'une pollution anthropique, sont marqués soit :

- par un apport combiné de nitrates et de chlorures (Balda Agri, n° 7, et Fadaré Puits, n° 18);

- par un apport combiné de nitrates et de sulfates (Kourdaya, n° 28).

Dans le losange, les eaux se répartissent en deux faciès : bicarbonaté calcique et bicarbonaté sodique. **On observe un passage quasi continu de la famille des eaux bicarbonatées calciques vers les eaux bicarbonatées sodiques.** Cette tendance traduit certainement un échange ionique comme nous le verrons plus loin avec le calcul des rapports caractéristiques d'indice d'échanges de base.

ii) - <u>Diagramme de Schoeller-Berkaloff</u>.

Sur les figures A5.1 à A5.7 en annexe 3, nous avons représenté toutes les analyses par localité. La figure 5.9 donne une synthèse des résultats groupés en fonction des valeurs minimales et maximales pour chaque ion et pour chaque faciès identifié.

Il apparaît sur cette figure que **les eaux bicarbonatées sodiques sont plus minéralisées que les eaux bicarbonatées calciques.** Les eaux bicarbonatées calciques, magnésiennes et sodiques ont une minéralisation intermédiaire entre les deux faciès précédents. L'évolution de ces dernières vers le pôle magnésien apparaît bien sur la figure 5.9.

iii) - Conclusion.

A la suite de ces deux représentations, nous remarquons que : **toutes les eaux sont bicarbonatées;** la distinction des faciès chimiques porte essentiellement sur le calcium, le sodium et dans des cas particuliers sur le magnésium. **L'hétérogénéité des eaux est donc liée aux concentrations en cations.**

5.3.2. Classification chimique des eaux.

Tableau 5.1. Regroupement des points d'eau par bassin hydrogéologique et suivant le faciès chimique.

Formules caractéristiques	Bassin : piémont	Bassin : Yaérés	Formations lithologiques	Familles d'eau
rHCO3>rcl>rSO4 ou rHCO3>rSO4>rcl et rCa>r(Na+K)>rMg	Fadaré (marché) Bakouré, Bogo Kourdaya, Ngaba	Diéguéré Louba Louba Magaldao	Alluvions superficielles	Bicarbonatée calcique
rHCO3>rcl>rSO4 ou rHCO3>rSO4>rcl et r(Na+K)>rCa>rMg	Balda, Fadaré (Lamido) Koragari		Altérites	Bicarbonatée sodique
		Alagarno, Andirni Djamegana, Djiddel Habillé, Louba Louba	Alluvions profondes	
rHCO3>rSO4>rcl et rMg>rCa>rK>rNa		Tchédé, Guirvidig		Bicarbonatée calcique, magnésienne et sodique

i) - Famille des eaux bicarbonatées calciques.

Cette famille représente environ 43 % de nos analyses. Les ions dominants sont HCO_3^- et Ca^{++}. Les teneurs en SO_4^{--} et en Cl^- sont très faibles par rapport à celle du bicarbonate. On note une légère différence de concentration en ions SO_4^{--} et Cl^- ; ce qui permet de distinguer dans cette famille deux sous

familles en fonction uniquement des concentrations en anions. Les formules caractéristiques sont représentées par les relations :

$$- rHCO_3 > rCl > rSO_4 \text{ ou } rHCO_3 > rSO_4 > rCl \qquad (5.1)$$

$$- rCa > r(Na + K) > rMg \qquad (5.2)$$

Ces eaux sont caractéristiques des ouvrages captant les niveaux superficiels dans les bassins du piémont et des Yaérés (tableau 5.1). Ces ouvrages sont directement sous l'influence des eaux provenant des zones de recharge.

ii) - Famille des eaux bicarbonatées sodiques.

Plus de 50 % de nos analyses ont ce faciès. Le sodium est plus représenté que le potassium. La distinction de sous familles qui a été faite dans le cas des eaux bicarbonatées calciques est applicable dans cette famille. Les formules caractéristiques de cette famillle d'eau sont les suivantes :

$$- rHCO_3 > rCl > rSO_4 \text{ ou } rHCO_3 > rSO_4 > rCl \qquad (5.3)$$

$$- r(Na + K) > rCa > rMg \qquad (5.4)$$

Ce faciès est plus représenté dans le bassin des Yaérés que dans celui du piémont. Dans ce dernier, il caractérise les forages implantés dans les niveaux altérés (Balda, Kolagari et Fadaré Lamido). Tandis que dans les Yaérés, ce sont les eaux des niveaux profonds.

iii) - Famille des eaux bicarbonatées calciques, magnésiennes et sodiques.

Cette famille est bien moins représentée en points de mesure que les deux précédentes. Elle caractérise les eaux de Tchédé et de Guirvidig (figure 5.10). Les formules caractéristiques sont :

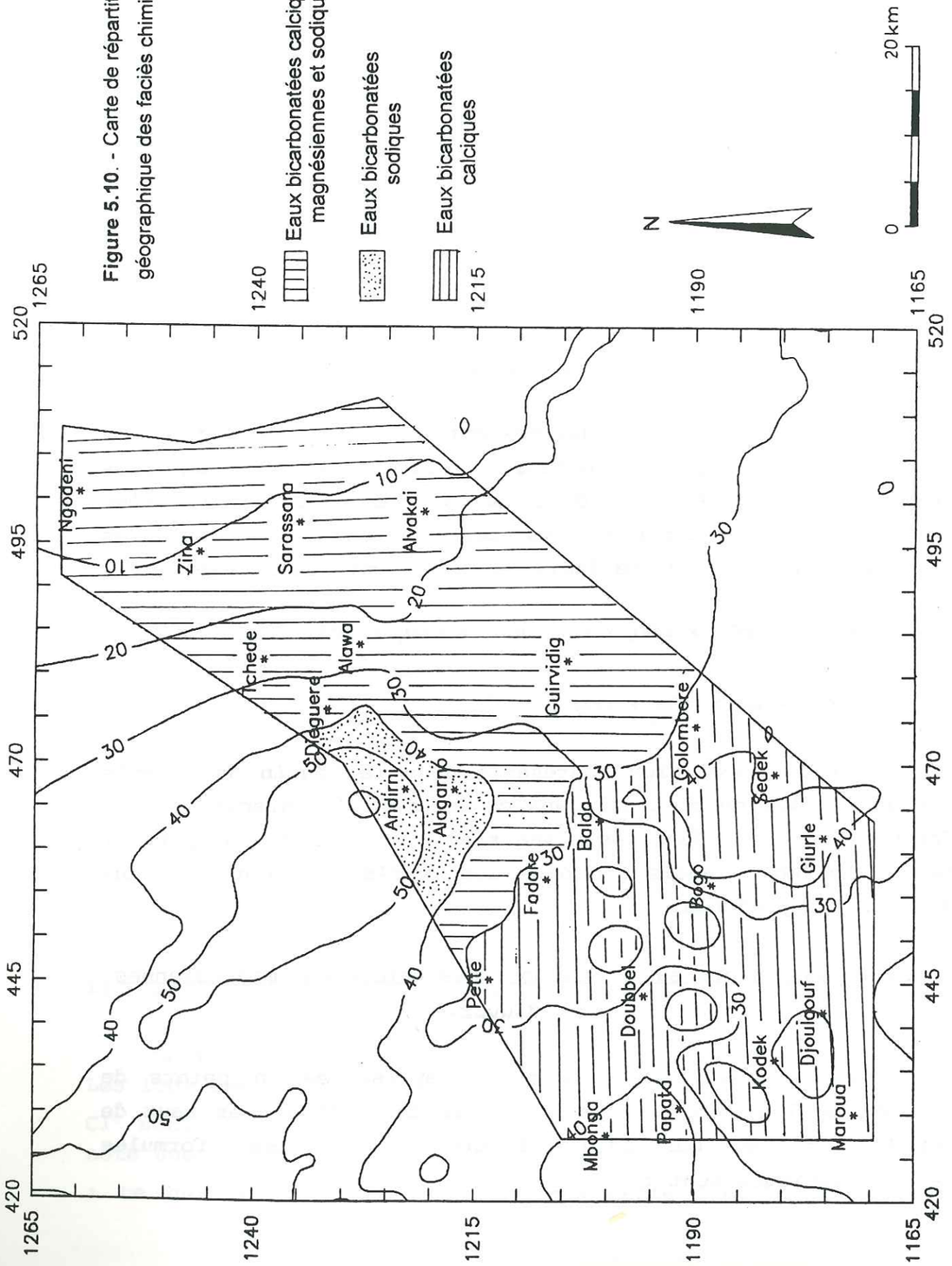


Figure 5.10. - Carte de répartition géographique des faciès chimiques.

- $rHCO_3 > rSO_4 > rCl$ (5.5)

- $rMg > rCa > rK > rNa$ avec $r(Ca+Mg) > r(Na+K)$ (5.6)

Les ions Mg^{++}, Ca^{++} et K^{+} sont représentés en proportions comparables. Il s'agit des ions fortement mobilisés dans la constitution structurale de la montmorillonite. En effet, les points d'eau de Tchédé et de Guirvidig sont situés sous des argiles de surface réputées pour leur richesse en montmorillonite.

Le chimisme particulier de ces eaux, ajouté aux variations des courbes isohypses de la carte de la surface piézométrique des nappes (cf. figure 4.7), ainsi que la distance des ouvrages par rapport aux cours d'eau existants dans le secteur, **suggèrent une alimentation des nappes souterraines à partir des eaux des mares, ce qui n'etait pas admis jusqu'ici.**

Par ailleurs, des fortes teneurs en nitrates (89 mg/l) avait été mesurée dans un point d'eau de Diéguéré par **Biscaldi** (1970). Nos analyses présentent également dans un forage de la même localité, une concentration en nitrates de 16 mg/l. Ceci pourrait indiquer des apports à la nappe par des eaux d'inondation polluées par les animaux du Parc de Waza.

L'éventualité de la recharge des nappes à partir des mares pose le problème de l'infiltrabilité des argiles de surface, qui en fin de saison sèche, présentent des fentes de déssiccation d'environ 1 mètre pour une épaisseur moyenne de la formation estimée à moins de 2 mètres.

5.4. Importance des éléments majeurs.

Les histogrammes de distribution des teneurs en éléments majeurs sont présentés sur les figures A5.8 (anions) et A5.9 (cations) en annexe 3.

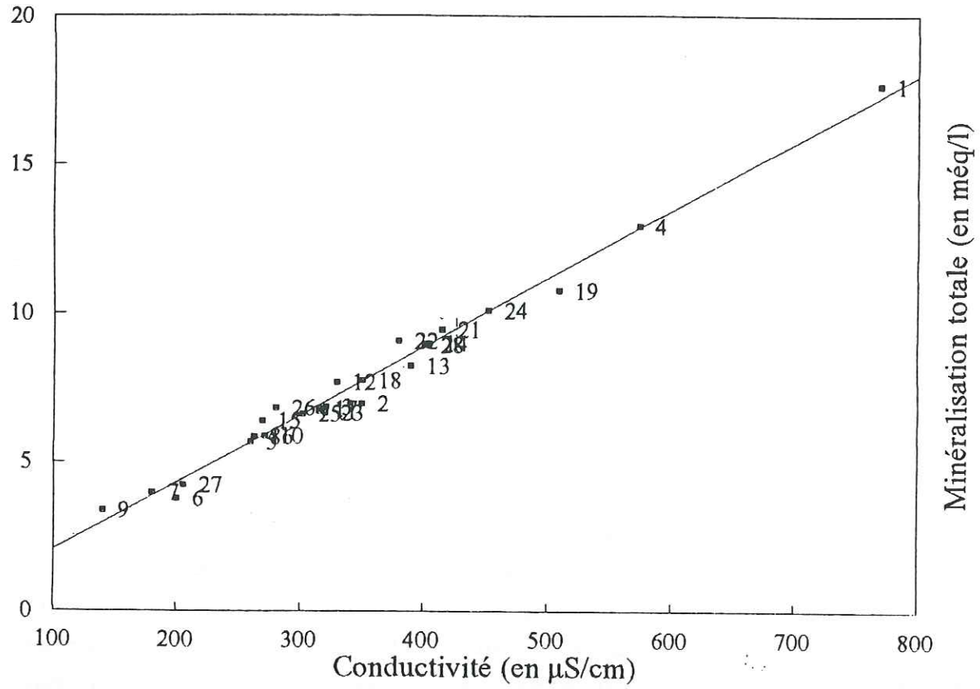


Figure 5.11. - Relation conductivité/minéralisation totale des eaux souterraines.

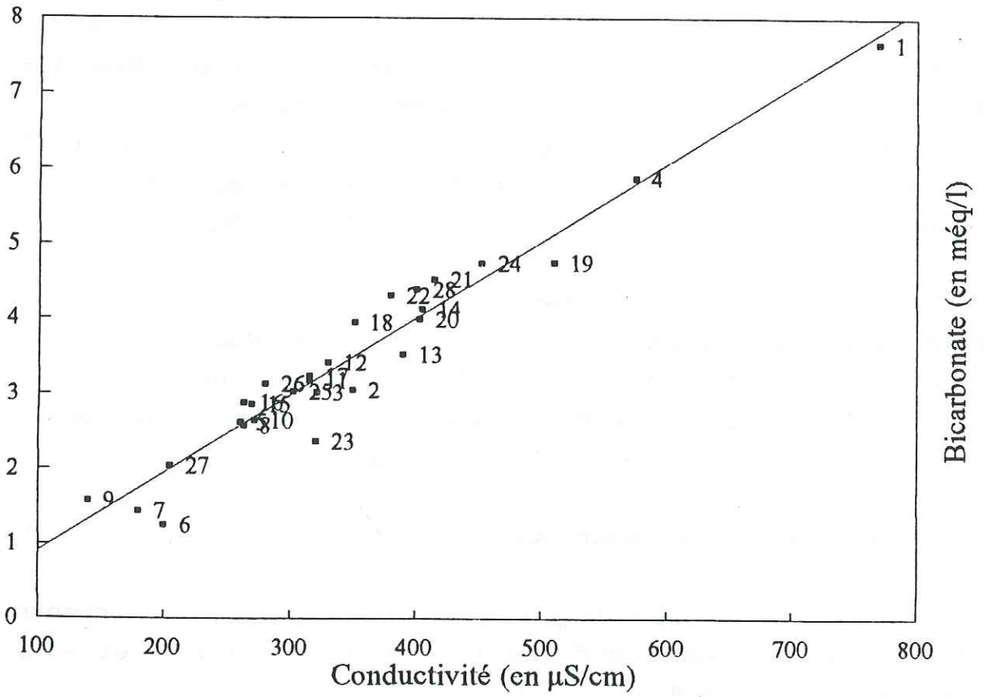


Figure 5.12. - Relation conductivité/bicarbonate des eaux souterraines.

5.4.1. Les anions.

i) - Les bicarbonates

Les diagrammes réalisés à partir de 28 analyses entre la conductivité, (C), et la minéralisation totale, (Mt), d'une part (figure 5.11) et entre la conductivité, (C), et les bicarbonates, (B), d'autre part (figure 5.12), donnent les équations suivantes :

- **Mt = 0,0227*C - 0.19** r^2**=0,98** **(5.7)**

- et **B = 0,0103*C - 0.12** r^2**=0,94** **(5.8)**

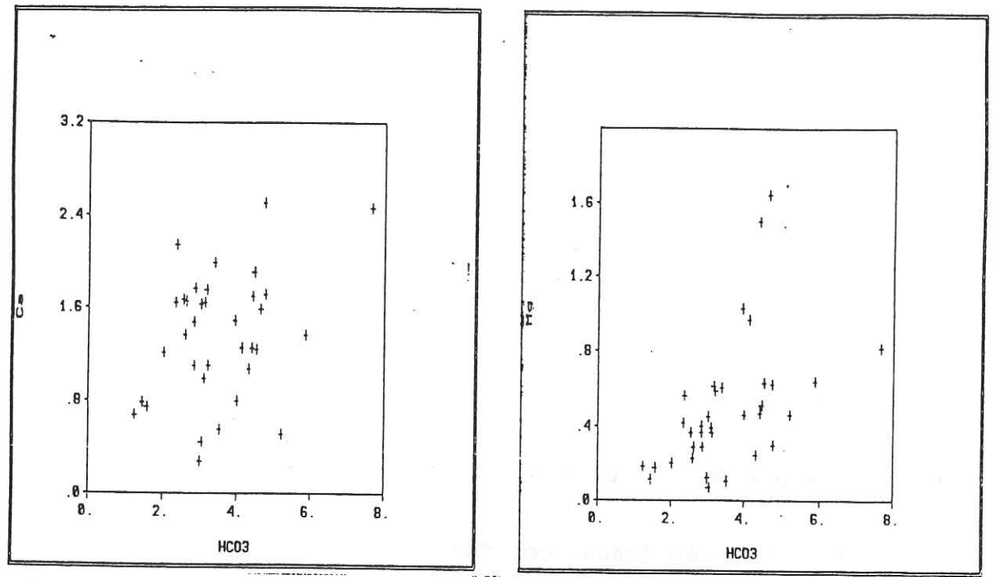
On note une très bonne corrélation entre conductivité et alcalinité. Par ailleurs, en dehors du potassium, on observe sur les figures 5.13a, 5.13b, 5.13c et 5.13d, une augmentation relative de la teneur en HCO_3 et des cations Ca, Mg et Na. **Il apparaît que ce sont les bicarbonates qui président à la mise en solution ionique des constituants matriciels** : la salinité est surtout acquise dans les horizons aérés du sol où se produisent les réactions d'altération des silicates - par exemple, l'attaque chimique de l'albite en kaolinite ou en montmorillonite - (**Ousmane** et al, 1983; **Aranyossy**, 1990; **Mbonu**, 1991).

$$2NaAlSi_3O_8+11H_2O+2CO_2 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4+HCO_3^-+2Na^++4H_4SiO_4 \quad (5.9)$$

$$2,33NaAlSi_3O_8+8,64H_2O+2CO_2 \rightarrow Na_{0,33}Al_{2,33}Si_{3,67}O_{10}(OH)_2+2HCO_3 +2Na^++3,32H_4SiO_4 \quad (5.10)$$

ii) - Les sulfates, les chlorures et les nitrates.

Sur les figures 5.14a, 5.14b et 5.14c, les ions Cl^-, SO_4^- et NO_3^- ne présentent aucune relation de dépendance avec l'ion HCO_3^-, ce qui fait penser que leur mise en solution n'est pas liée au processus d'altération des minéraux aluminosilicatés



Figures 5.13a à 5.13d. - Relation entre les ions Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+}, K^{+} et les ions HCO_3^- (en méq/l).

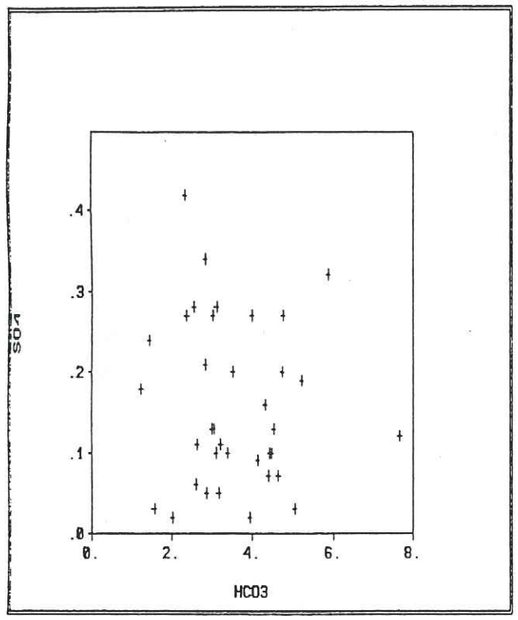
évoqué précédemment pour les bicarbonates. La présence de ces ions dans nos eaux peut résulter d'un apport météorique et anthropique.

Pour ce qui concerne **les sulfates**, leurs teneurs et celles des ions calcium ne sont pas comparables (figure 5.14d); ce qui laisse penser qu'une mise en solution à partir de l'anhydrite ou de sa forme hydratée, le gypse est à exclure. La présence de fortes teneurs en fer signalée dans les eaux de la région (rapports BRGM) ainsi que la présence de pyrite dans les roches du groupe volcano-sédimentaire de Maroua, font suspecter une origine du sulfate par oxydation du soufre de la pyrite avec mise en solution du fer.

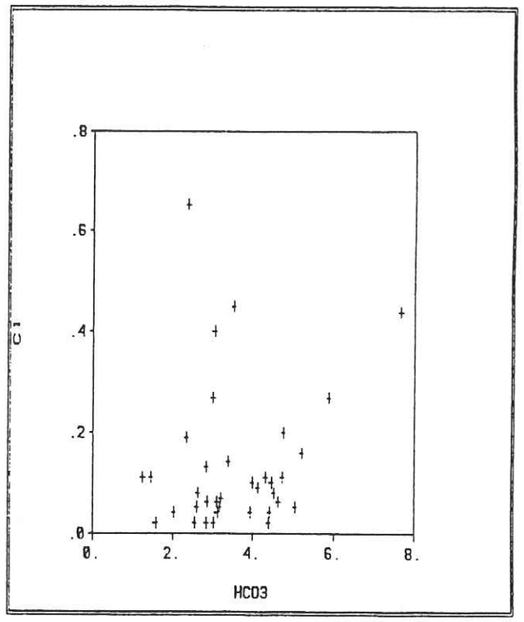
$$15/8O_2 + 1/2FeS_2 + H_2O \text{ ---> } H_2SO_4 + 1/4Fe_2O_3 \qquad (5.11)$$

Plus de 75 % de nos points d'eau ont des teneurs en **chlorures** inférieures 0,15 méq/l (figure A5.8b en annexe 3). Cette tendance est selon **Hem** (1985) caractéristique des eaux de surface. La faiblesse relative des teneurs de cette ion d'origine météorique suggère que les phénomènes évaporatoires ne jouent pas un grand rôle dans la salinisation des eaux souterraines (**Ousmane** et al, 1983). Il apparait comme nous le verrons avec la relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines du piémont, que l'infiltration est relativement rapide.

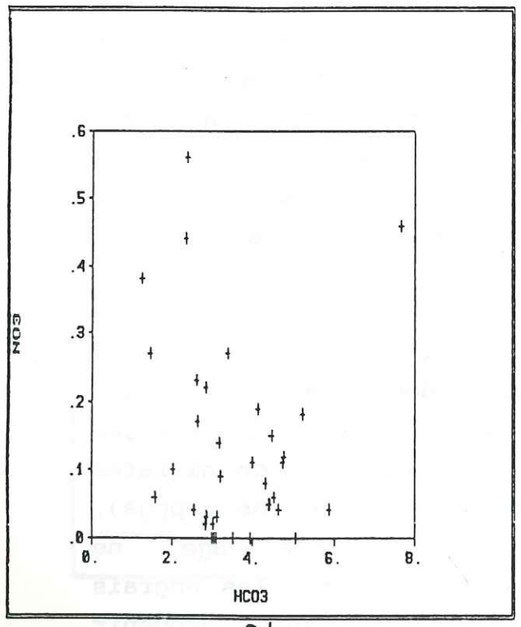
La présence des **nitrates** dans les eaux souterraines est généralement un indice de pollution domestique (existence d'anciennes décharges mal concues, les fuites au niveau des canalisations d'eaux usées, une charge importante en nitrates des eaux de surface qui peuvent communiquer avec les nappes), agro-pastorale (certaines installations d'élevage ne garantissant pas un stockage correct des lisièrs, les engrais chimiques) ou les rejets industriels. Il peut aussi provenir de l'oxydation bactérienne des matières organiques.



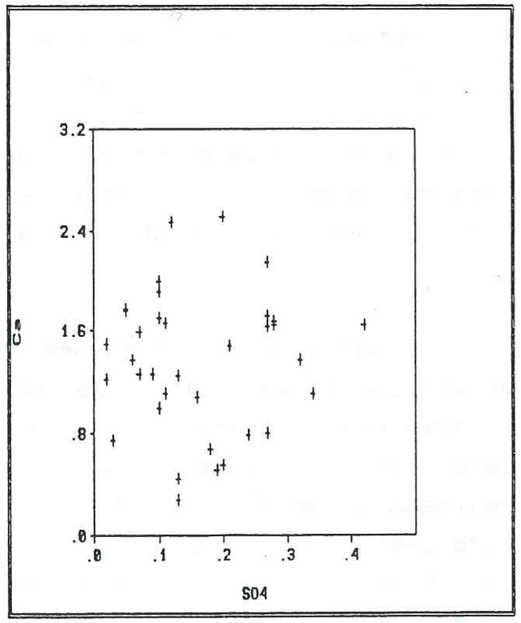
a/



b/



c/



d/

Figures 5.14a à 5.14c. - Relation entre les ions Cl^-, SO_4^{--}, NO_3^- et les ions HCO_3^- (en méq/l).

Figure 5.14d. - Relation entre Ca^{++} et SO_4^{--} (en méq/l).

Dans le périmètre étudié, les points d'eau ne sont pas situés au voisinage d'un périmètre agricole (pollution par les engrais). Leur éloignement par rapport aux lieux d'habitations est significatif (pollution domestique). Dans ce contexte, les teneurs en nitrates des eaux peuvent provenir :

- soit du recyclage des eaux utilisées pour l'abreuvage des troupeaux;

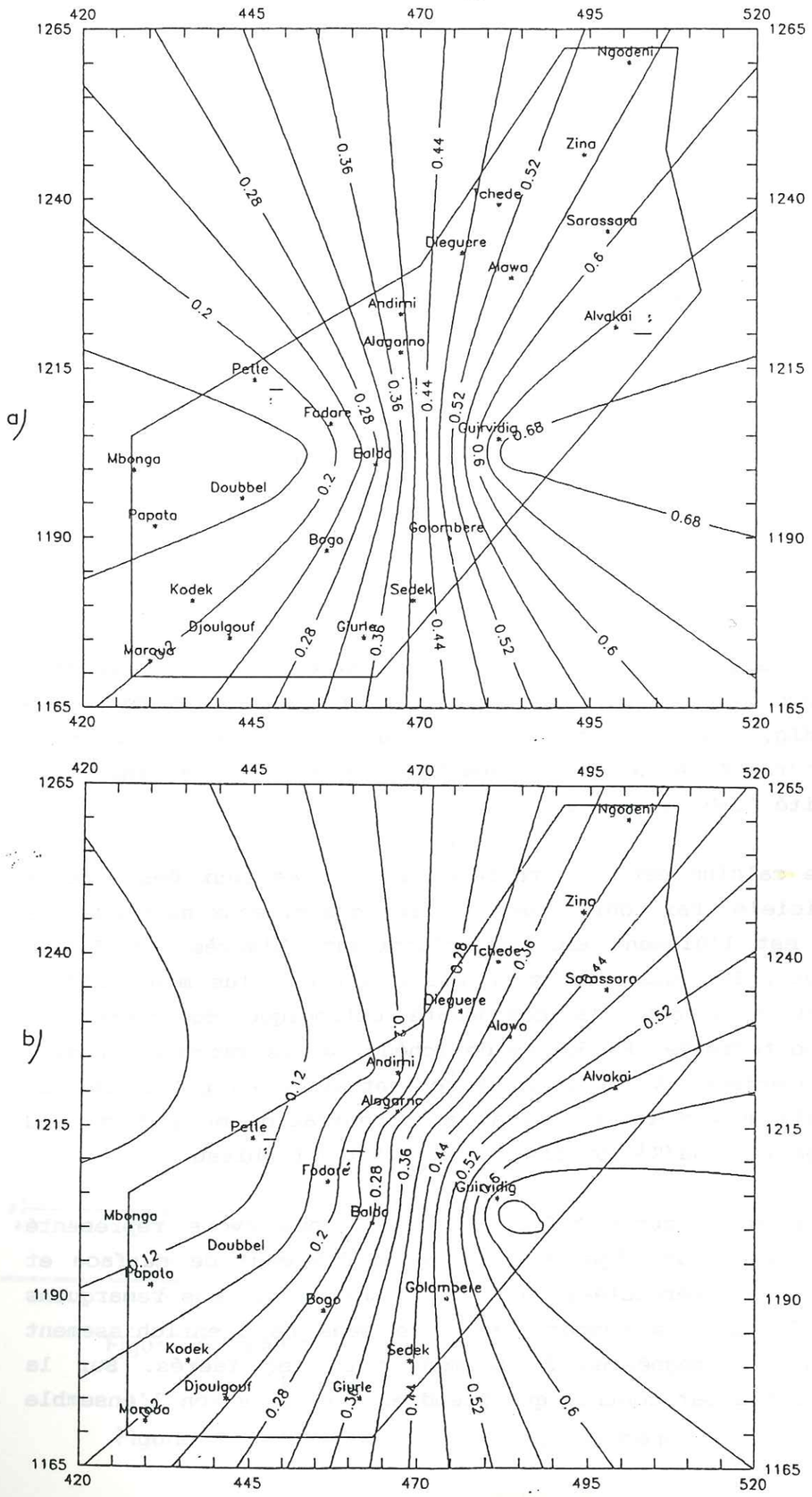
- soit de l'infiltration des eaux contaminées (par les produits d'oxydation bactérienne des matières organiques rejétées par le bétail et les animaux de la réserve de Waza) au cours de leur circulation.

5.4.2. Les cations.

Le calcium est le principal cation alcalino-terreux dans nos eaux : à l'exception des points d'eau de Tchédé et de Guirvidig, les concentrations en magnésium restent toujours inférieures à celles du Ca dans un rapport; r(Mg/Ca) inférieur à l'unité (tableau 5.2).

Le calcium est plus représenté dans les eaux des niveaux superficiels. Par contre, dans celles des niveaux profonds, le sodium est l'élément alcalin prédominant. D'après les faciès chimiques, les eaux riches en alcalins sont plus minéralisées que les eaux dont la composante cationique dominante est alcalino-terreuse. En dehors de Tchédé où les rapports r(Na/K) sont inférieurs à l'unité, la concentration en potassium est systématiquement inférieure à la concentration en sodium dans un rapport; r(Na/K) compris entre 3 et 137 (tableau 5.2).

Sur les figures 5.15a et 5.15b, nous avons représenté respectivement les équirapports Mg/Ca des eaux de surface et des eaux indifférenciées. Dans le premier cas, nous remarquons une évolution des rapports dans le sens de l'enrichissement des eaux en magnésium du piémont vers les Yaérés. Sur la figure 5.15b par contre, qui prend en considération l'ensemble



Figures 5.15a et 5.15b. - Cartes d'équirapports Mg/Ca.
a) - Niveaux aquifères superficiels.
b) - Niveaux aquifères indifférenciés.

des points d'eau (nappes superficielles et nappes profondes), le sens d'évolution des rapports est inversé.

Tableau 5.2. Rapports caractéristiques des eaux souterraines du périmètre étudié.

localité	Ca (méq/l)	Mg (méq/l)	Na (méq/l)	K (méq/l)	Mg/Ca	Na/Ca	Na/K
Alagarno (P)	2,46	0,82	5,48	0,20	0,33	2,23	27,40
Andirni (P)	0,44	0,07	2,84	0,07	0,16	6,45	40,57
Andirni (F)	0,27	0,12	3,01	0,07	0,44	11,15	43,00
Andirni (P)	1,37	0,64	4,28	0,11	0,47	3,12	38,91
Bakouré (F)	1,37	0,22	1,10	0,08	0,16	0,80	13,75
Balda Agri (P)	0,68	0,18	0,82	0,20	0,26	1,21	4,10
Balda Agri (P)	0,78	0,11	0,88	0,16	0,14	1,13	5,50
Bogo piézo	1,67	0,36	0,84	0,10	0,22	0,50	8,40
Bogo Marché (F)	0,75	0,17	0,71	0,08	0,23	0,95	8,88
Bogo piézo	1,66	0,28	0,82	0,15	0,17	0,49	5,47
Diéguéré (F)	1,76	0,61	0,74	0,23	0,35	0,42	3,22
Diéguéré (F)	1,99	0,60	0,91	0,32	0,30	0,46	2,84
Djamegana (F)	0,55	0,10	3,35	0,08	0,18	6,09	41,88
Djiddel (F)	1,70	0,47	2,01	0,15	0,28	1,18	13,40
Djiddel (P)	1,26	0,97	2,11	0,17	0,77	1,67	12,41
Fadaré(P)	1,48	0,40	1,38	0,06	0,27	0,93	23,00
Fadaré (F)	0,51	0,46	4,18	0,08	0,90	8,20	52,25
Fadaré (P)	2,15	0,56	1,09	0,30	0,26	0,51	3,63
Fadaré (P)	1,77	0,28	0,77	0,06	0,16	0,44	12,83
Guingley P	1,10	0,59	1,60	0,04	0,54	1,45	40,00
Guingley F1	0,99	0,39	1,76	0,05	0,39	1,78	35,20
Guingley F2	1,11	0,36	1,87	0,10	0,32	1,68	18,70
Guirvidig (P)	1,49	1,03	1,18	0,06	0,69	0,79	19,67
Habillé (P)	1,72	0,29	3,22	0,16	0,17	1,87	20,13
Habillé (P)	0,80	0,46	3,12	0,11	0,58	3,90	28,36
Kolagari (F)	1,25	0,63	2,75	0,02	0,50	2,20	137,50
Koragari (P)	1,08	0,24	3,02	0,09	0,22	2,80	33,56
Kourdaya (F)	1,65	0,41	1,11	0,12	0,25	0,67	9,25
Louba Louba (P)	1,91	0,51	1,87	0,18	0,27	0,98	10,39
Louba Louba (P)	2,50	0,62	1,63	0,19	0,25	0,65	8,58
Magaldao (P)	1,63	0,45	1,17	0,08	0,28	0,72	14,63
Magaldao (P)	1,65	0,36	1,30	0,09	0,22	0,79	14,44
Ngaba (P)	1,22	0,20	0,56	0,09	0,16	0,46	6,22
Tchédé (F)	1,59	1,64	0,81	0,95	1,03	0,51	0,85
Tchédé (F)	1,26	1,50	0,72	0,94	1,19	0,57	0,77

En l'absence de calculs d'équilibre, il apparait difficile d'expliquer l'origine des faibles ou des fortes teneurs de chacun des cations contenus dans nos eaux. Toutefois, comme nous avons déjà eu à le souligner, la

position des eaux bicarbonatées calciques dans le diagramme de Piper laisse présager des substitutions du genre Ca^{++} ----> $2Na^{+}$ rendues possibles du fait que les deux cations ont une dimension ionique assez proche.

5.5. Le rôle de l'argile et l'échange de bases entre l'eau souterraine et le milieu aquifère.

D'après **Schoeller** (1962), les permutolites ou substances contenues dans les terrains et susceptibles d'adsorber et d'échanger sont : les minéraux argileux (sens large), les minéraux zéolitiques, l'hydroxyde ferrique et les substances organiques (l'humus par exemple).

Dans notre zone d'étude, ces permutolites sont représentés d'une part par les minéraux argileux de la frange d'altération du Piémont, et d'autre part par les couches argileuses intercalées entre les alluvions superficielles et les alluvions profondes dans le domaine des Yaérés.

L'indice d'échange de bases tel que défini par **Schoeller** est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature, primitivement existants. Deux cas d'échange de bases peuvent se produire :

- l'échange de base positif ou échange des alcalins (Na^{+} et K^{+}) de l'eau contre les alcalino-terreux (Ca^{++} et Mg^{++}) des permutolites :

$$i.e.b = r[cl-(Na+K)]/rcl \qquad (5.12)$$

- échange de bases négatif ou échange des alcalino-terreux (Ca^{++} et Mg^{++}) de l'eau contre des alcalins (Na^{+} et K^{+}) des permutolites :

$$i.e.b = r[cl-(Na+K)]/[(SO_4+HCO_3+NO_3)] \qquad (5.13)$$

Tableau 5.3. Résultats des indices d'échange de bases.

Localité	[Cl-(Na+K)]/Cl	[Cl-(Na+K)]/ (SO4+HCO3+NO3)	Localité	[Cl-(Na+K)]/Cl	[Cl-(Na+K)]/ (SO4+HCO3+NO3)
Alagarno (P)	-11,91	-0,64	Fadaré (P)	-12,83	-0,26
Andirni (P)	-6,28	-0,79	Guingley P	-22,43	-0,46
Andirni (F)	-10,41	-0,89	Guingley F1	-29,17	-0,55
Andirni (P)	-15,26	-0,66	Guingley F2	-14,15	-0,54
Bakouré (F)	-22,60	-0,39	Guirvidig (P)	-30,00	-0,30
Balda Agri (P)	-8,27	-0,50	Habillé (P)	-15,90	-0,62
Balda Agri (P)	-8,45	-0,48	Habillé (P)	-31,30	-0,72
Bogo piézo	-46,00	-0,32	Kolagari (F)	-33,63	-0,57
Bogo Marché (F)	-38,50	-0,46	Koragari (P)	-27,27	-0,66
Bogo piézo	-11,13	-0,31	Kourdaya (F)	-5,47	-0,32
Diéguéré (F)	-18,40	-0,27	Louba Louba (P)	-19,50	-0,41
Diéguéré (F)	-7,79	-0,29	Louba Louba (P)	-15,55	-0,34
Djamegana (F)	-6,62	-0,80	Magaldao (P)	-61,50	-0,37
Djiddel (F)	-53,00	-0,46	Magaldao (P)	-33,75	-0,39
Djiddel (P)	-24,33	-0,50	Ngaba (P)	-15,25	-0,28
Fadaré(P)	-71,00	-0,46	Tchédé (F)	-28,33	-0,36
Fadaré (F)	-25,63	-0,74	Tchédé (F)	-82,00	-0,36
Fadaré (P)	-1,14	-0,23			

Les rapports (5.12) et (5.13) ont été calculés pour toutes nos eaux analysées. Toutes les eaux se caractérisent par des rapports négatifs. Ces résultats corroborent ceux du diagramme de Piper dans lequel on observe une série Ca--->Na. Le plus faible indice d'échanges de base est de -0,89 et le maximum de -0,23. 75 % des points d'eau ont des indices compris entre -0,89 et -3,35 (tableau 5.3).

Tableau 5.4. Caractéristiques analytiques des vertisols nodaux (d'après **Seyni-Boukar**, 1990).

Profondeur (cm)	Bases échangeables Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	pH	Matières organiques (%)
0 - 2	74,5	22,8	2,2	0,5	6,4	0,85
2 - 50	77,9	19,4	1	1,6	7,2	0,87
50 - 70	74,6	20,6	1,2	3,6	7,7	0,87
70 - 130	70,5	22,4	1,3	5,8	7,5	0,75

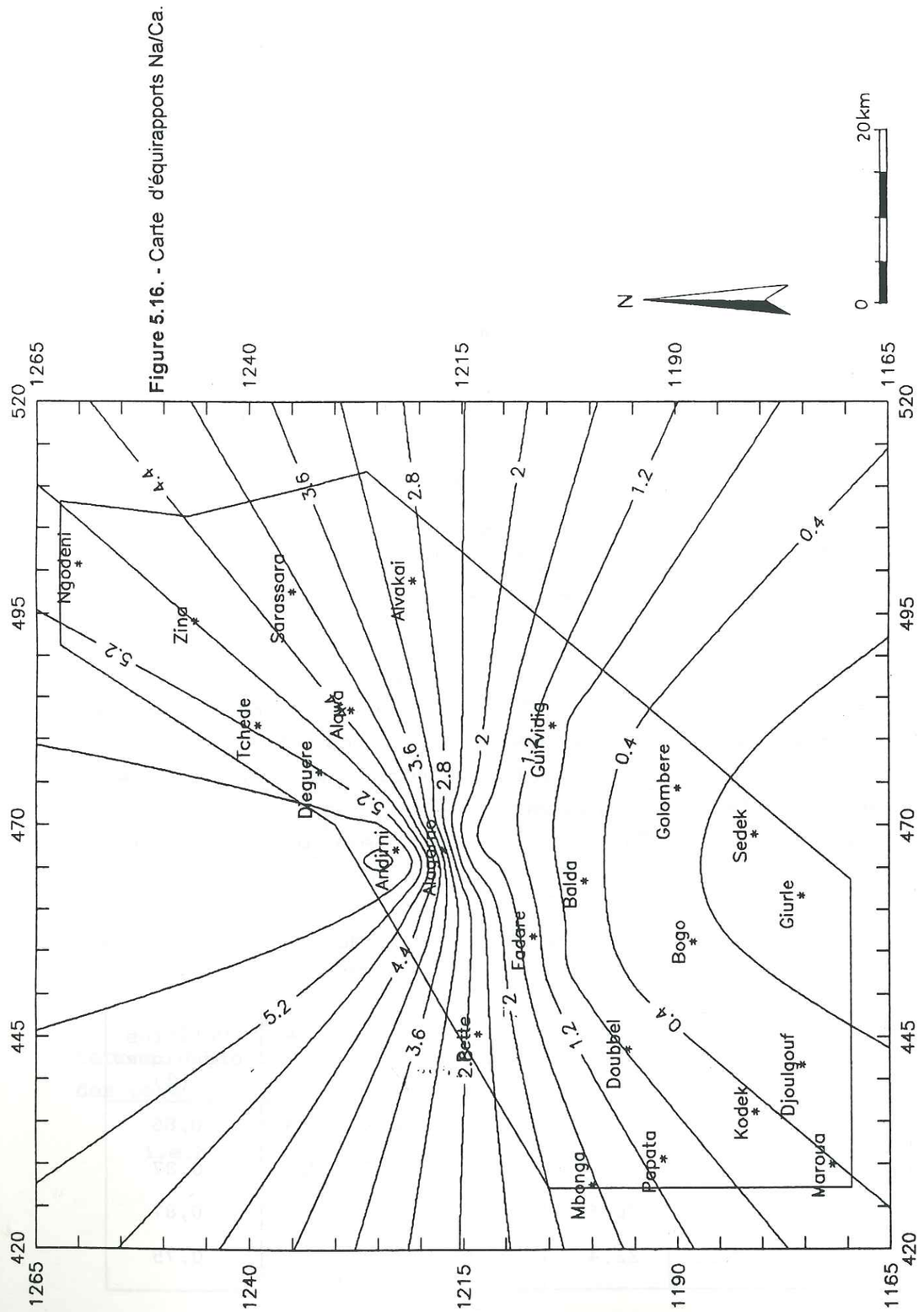


Figure 5.16. - Carte d'équirapports Na/Ca.

A partir des données du tableau 5.4 ci-dessus, on remarque que dans notre zone d'étude, les échanges de bases commencent à se produire dès le premier contact des eaux avec la couche pédologique de surface. Au fur et à mesure que l'eau s'infiltre dans les niveaux aquifères profonds, les échanges de bases font diminuer la teneur en calcium par échange contre le sodium des permutolites, les teneurs en anions restant pratiquement identiques. La diminution du calcium en faveur du sodium est traduite sur la carte d'équirapports Na/Ca (figure 5.16).

En effet, dans les minéraux argileux, le sodium et le potassium occupent toujours des sites échangeables; K^+ pouvant prendre la place de Na^+. Mais le potassium ayant un rayon ionique (1.33 A) supérieur à celui du sodium (0.98 A), cette différence de taille limite les échanges qui peuvent avoir lieu entre ces deux ions au sein de leurs encaissants ou de leurs combinaisons ioniques. Ainsi, au contact d'une eau riche en calcium, le Na des argiles pourra prendre facilement la place de Ca qui a un rayon ionique comparable (1.06 A). Dans ce cas, la concentration en sodium augmente pendant que celle du calcium diminue.

Toutefois, la diminution de Ca ne s'accompagne pas d'un accroissement corrélatif des concentrations en sodium dans les eaux souterraines. Ce fait peut résulter soit de la faible concentration des ions alcalino-terreux dans les échangeurs, soit des faibles proportions d'ions échangés.

5.7. Conclusion.

Les eaux souterraines étudiées sont de bonne qualité chimique avec une minéralisation très bien centrée dans les normes de la CEE et de l'O.M.S pour les eaux destinées à la consommation de l'homme et du bétail.

Les températures (29 à 34 °C) sont largement supérieures à la température moyenne de l'air (27 à 28 °C) et à la norme de l'O.M.S qui est de 15 °C. **De telles températures sont susceptibles de favoriser la prolifération bactérienne en cas de pollution organique.**

Les faibles conductivités dans les niveaux aquifères superficiels du secteur de Bogo, suggèrent une circulation rapide et par conséquent un apport extérieur tandis que dans les altérites ou les niveaux aquifères profonds des Yaérés, les fortes conductivités seraient regies par les conditions géologiques et hydrogéologiques : circulations lentes dans les formations peu perméables.

L'altération des minéraux silicatés, combinée aux échanges de bases, permettent de décrire les processus d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines du domaine étudié.

L'évaporation n'apparait pas comme un facteur déterminant dans la minéralisation des eaux : les chlorures qui sont de bons marqueurs de l'influence de l'évaporation, sont en très faibles concentrations dans nos eaux.

Le caractère particulier du faciès chimique des eaux de Tchédé montre que **contrairement à ce que pensent de nombreux chercheurs, l'alimentation des eaux souterraines peut se produire à partir des eaux des mares** et par conséquent, **il se pose le problème de la perméabilité des argiles de surface.**

La zonalité verticale des eaux dans le bassin des Yaérés - eaux bicarbonatées calcique en surface et sodique en profondeur - **conforte la distinction des différents niveaux aquifères ressortis par les coupes géologiques.** Les eaux bicarbonatées sodiques sont des eaux à renouvellement lent telles que l'indiquent leurs teneurs en tritium.

Chapitre 6. CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES.

6.1. Introduction.
6.2. Principes de base de l'hydrologie isotopique.
6.3. Présentation des résultats d'analyse des précipitations et des eaux de surface.
6.4. Interprétation des résultats d'analyse des eaux souterraines du périmètre étudié.
6.5. Conclusion.

6.1. Introduction.

La technique des isotopes du milieu peut être employée à deux stades de l'étude hydrogéologique, dans une phase préalable de prospection et de reconnaissance et surtout dans l'étude approfondie du système hydrogéologique où elle permet de préciser certaines caractéristiques de l'aquifère et ses mécanismes de fonctionnement que les autres méthodes ne peuvent fournir (**Blavoux**, 1978).

L'interprétation des données a permis d'aborder les problèmes de l'origine des eaux souterraines et de leur mode de recharge d'une part, du temps de séjour et de renouvellement des ressources en eaux souterraines d'autre part.

Compte tenu de l'insuffisance de publications sur l'utilisation des techniques isotopiques en hydrologie et en hydrogéologie au Cameroun, nous allons, avant d'aborder l'interprétation des données isotopiques, rappeler succinctement quelques notions préliminaires et fondamentales du traçage isotopique.

6.2. Principes de base de l'hydrologie isotopique.

6.2.1. Généralités.

Les isotopes d'un élément sont des atomes dont le noyau compte le même nombre de protons, mais non le même nombre de neutrons.

Parmi les isotopes stables et les isotopes radioactifs, certains sont constitutifs de la molécule d'eau : ce sont les traceurs "intimes" de l'eau (l'oxygène-18, le deutérium et le tritium). Ils tracent la molécule elle même. D'autres sont apportés par le milieu à partir de la dissolution de gaz ou de solides : ce sont les isotopes des solutés ou traceurs

extrinsèques de l'eau. Exemples les isotopes du carbone dissous (carbone-13 et carbone-14), les isotopes du soufre (^{34}S), les isotopes de l'azote (^{15}N), les isotopes du chlore (^{36}Cl), etc...

Dans le cadre de cette étude, c'est l'utilisation des isotopes constitutifs de la molécule d'eau qui est abordée à partir de l'analyse des eaux souterraines du Grand Yaéré.

6.2.2. Les isotopes du milieu.

6.2.2.1. Les isotopes stables. Oxygène-18 et deutérium.

La composition isotopique se définit en parts pour mille de différence et s'exprime en unité delta notée, δ.

$$\delta = [(R_{\text{échantillon}} - R_{\text{standard}})/R_{\text{standard}}]*1000 \qquad (6.1)$$

$$\text{avec } R = {}^{18}O/{}^{16}O \text{ ou } D/H \qquad (6.2)$$

Pour un million de molécules d'eaux naturelles dont la composition isotopique est "normale" ($H_2{}^{16}O$), il y a 2000 molécules environ de $H_2{}^{18}O$ contenant l'isotope lourd (oxygène-18), et 320 molécules environ de $HD^{16}O$ dans lesquelles l'un des deux atomes ordinaires de l'hydrogène est remplacé par le deutérium (^2H ou D). On a constaté que l'eau de mer contient plus de molécules dont les isotopes sont plus lourds que l'eau douce (**Abusada**, 1980).

Ainsi, le standard de référence; le SMOW (Standard Mean Oceanic Water), définit la composition isotopique moyenne théorique de la masse océanique : le delta (δ) de l'eau de mer est zéro par définition.

6.2.2.2. Les isotopes radioactifs : le tritium.

Les isotopes radioactifs sont des éléments ayant des noyaux à structure instable pouvant engendrer des novaux

nouveaux appelés radiogéniques. Leurs concentrations obéissent à la loi exponentielle de décroissance radioactive. Ces isotopes émettent des rayonnements en se désintégrant. Ces rayonnements sont au nombre de trois : alpha, béta et gamma.

Le tritium qui nous intéresse, émet des rayonnements béta négatifs, (β^-). C'est le seul isotope radioactif de la molécule d'eau. Les teneurs en tritium s'expriment en unité tritium (UT). 1 UT correspond à la présence d'un atome de tritium pour 10^{18} atomes d'hydrogène banal ($^1{}_1H$). **La période radioactive ou temps de demi vie** du tritium est de 12,26 ans .

6.2.3. Les variations naturelles de la composition isotopique de l'eau.

6.2.3.1. Le facteur de fractionnement.

Lorsque deux phases sont en contact (liquide-vapeur ou liquide-solide), en raison des pressions partielles de vapeur de chacune des espèces isotopiques, il se produit un enrichissement de l'une par rapport à l'autre. Le taux d'enrichissement ou facteur de fractionnement (&) est le quotient entre les rapports isotopiques des deux phases :

$$\&_{1-2} = R_{(\text{phase 1})} / R_{(\text{phase 2})} \qquad (6.3)$$

$$\&_{1-2} = (1000 + \delta_1)/(1000 + \delta_2) \qquad (6.4)$$

Dans la pratique, & est très proche de 1. Ainsi, pour traduire & en chiffres simples, on utilise le facteur d'enrichissement isotopique, (E), qui est lié à & par l'expression :

$$E = (\& - 1)1000 \text{ en } {}^o/_{oo} \qquad (6.5)$$

Dans le cas de l'eau, les variations de teneurs en isotopes lourds sont dues essentiellement aux réactions de

transfert qui ont lieu lors des phénomènes de changements de phase : la condensation et l'évaporation.

6.2.3.2. Marquage en isotopes stables au cours de la condensation.

La condensation ou le passage eau-vapeur/eau-liquide se fait à l'équilibre. Au cours de ce passage, le fractionnement isotopique provoque un appauvrissement en isotopes lourds de la phase vapeur en faveur de la phase liquide. Par la suite, cette masse de vapeur ne donnera lieu à de nouveaux stades de condensation que si la température s'abaisse ou si la pression augmente (**Fontes**, 1976).

Les modifications ou variations de la composition isotopique des précipitations obéissent à des facteurs liés à la température de condensation (la latitude, l'altitude, la saison) ou à la diminution du "stock atmosphérique" (effet de continentalité).

i) - Effet de latitude. La composition isotopique dans les précipitations diminue quand la latitude augmente cela en relation directe avec l'abaissement de la température de l'air.

ii) - Effet d'altitude. La composition isotopique dans les précipitations diminue quand la masse d'air humide s'élève par suite des reliefs topographiques; les nuages déjà appauvris en isotopes lourds subissent un abaissement encore plus marqué de leur teneur en isotope lourd du fait de la diminution de la température de condensation.

Le gradient observé en oxygène-18 pour le Mont Cameroun est de -0,16 $^{o}/_{oo}$ pour 100 m (**Fontes**, 1976); **Gasparini** et al (1990) ont trouvé un gradient du même ordre, -0,13 $^{o}/_{oo}$ pour 100 m pour le Gran Canaria Sud et -0,25 $^{o}/_{oo}$ pour 100 m pour le Gran canaria Nord.

iii) - Effet de saison. Les pluies d'été (saison sèche) sont généralement plus riches en isotopes lourds que les pluies d'hiver (saison humide).

Dans les zones tropicales sèches et humides comme dans les zones sahéliennes, les teneurs en isotopes stables du début et de la fin de saison de pluie sont fortement enrichies par l'effet d'évaporation pendant la chute de pluie (**Loehnert**, 1988; **BRGM**, 1986; **Travi** et al, 1987; **Yurtserver** et **Gat**, 1981 in **Onugba**, 1990).

Jusserand (1979 in **Sarrot-Reynauld** et **Traoré**, 1989) a montré que les teneurs en isotopes lourds dans les précipitations de Bamako (Mali) présentaient de fortes fluctuations lors d'une même averse : les $\delta^{o}/_{oo}$ ^{18}O et ^{2}H les plus négatifs s'observent pour les averses les plus importantes et plus particulièrement en juillet et en août.

iv) - L'effet paléoclimatique. Les eaux précipitées sous un climat plus froid sont généralement appauvries en isotopes lourds. D'après **Faure** et al (1970), l'alimentation des nappes profondes au voisinage du lac Tchad devrait pouvoir être corrélée aux avancées du lac Tchad lors des périodes humides du Quaternaire récent. Certaines valeurs d'oxygène-18 de l'ordre de -10 et -11 pour mille vs SMOW témoigneraient, si elles correspondaient à des moyennes, de conditions climatiques sensiblement différentes des actuelles avec une température plus basse et une humidité relative nettement plus élevée.

v) - L'effet de continentalité. La vapeur qui s'élève au dessus d'un réservoir est toujours appauvrie en isotopes lourds par rapport au liquide qui lui donne naissance (La vapeur issue de l'océan est en moyenne appauvrie de 12 à 15 $^{o}/_{oo}$ en oxygène-18 ($\delta^{18}O$ = -12 à -15 $^{o}/_{oo}$ vs SMOW) et de 80 à 120 $^{o}/_{oo}$ en ^{2}H). Inversement, la condensation d'une fraction de vapeur donne un liquide plus riche qu'elle en isotopes lourds. Elle

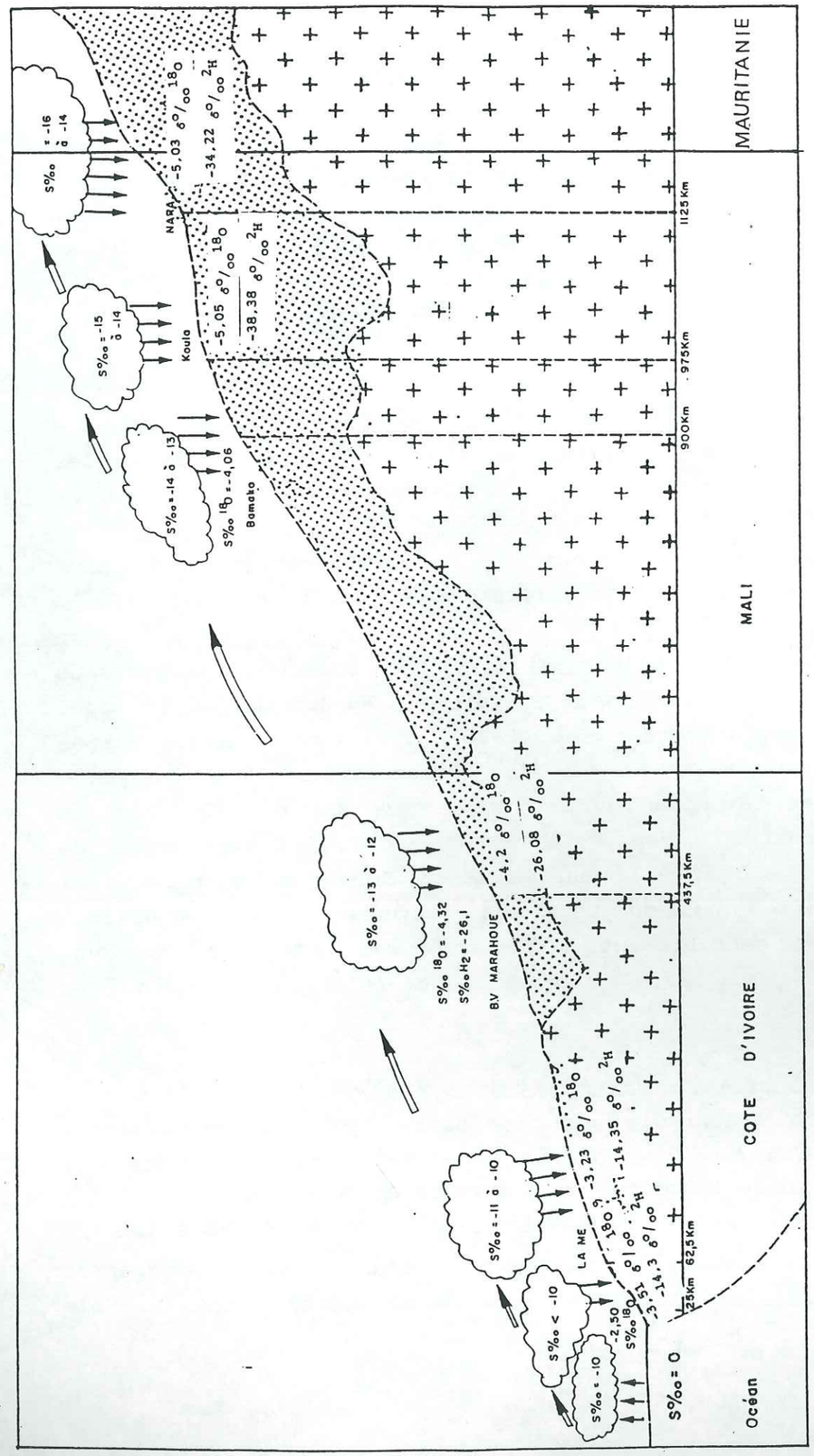


Figure 6.1. - Variations des teneurs en oxygène-18 et en deutérium dans les eaux de surface, eaux souterraines et vapeurs d'eaux en fonction des distances d'éloignement de la mer en Afrique de l'Ouest (d'après **Biemi**, 1992).

laisse par effet de bilan une vapeur résiduelle appauvrie (**Blavoux**, 1978).

Lorsqu'une masse d'air océanique se dirige vers le continent, elle subit plusieurs stades de refroidissement et de condensation; il se produit un fractionnement isotopique thermique et les précipitations deviennent de plus en plus pauvres en isotopes lourds vers l'intérieur des terres que l'eau de mer dont elles proviennent : **c'est l'effet de continentalité.**

D'Abidjan (Côte d'Ivoire) à Nara (Mali), les variations des teneurs en isotopes lourds (^{18}O et ^{2}H) en fonction de la distance à la mer ont été étudiées par **Biemi** (1992) à partir des travaux de **Baudet J.** (1974 et 1975); **Jusserand C.** (1976); **Dincer T.** et al (1983); **Traoré A. Z.** (1985); **Jourda J. P.** (1987) et **Soro N.** (1987). L'auteur remarque que les teneurs en isotopes lourds (^{18}O et ^{2}H) sont de plus en plus négatives à mesure que l'on s'éloigne des côtes océaniques, en rapport avec l'appauvrissement en isotopes lourds de la vapeur d'eau et des précipitations lors du déplacement sur le continent (figure 6.1).

Les travaux de **Joseph A.** et **Aranyossy J. F.** (1989); **Sarrot-Reynauld J.** et **Traoré A. Z.** (1989) ont montré que l'effet de continentalité lié au sens de déplacement de la mousson est très probablement modifié par le déplacement des lignes de grains caractéristiques de la zone sahélienne.

6.2.3.3. Marquage en isotopes stables au cours de l'évaporation.

Au cours de l'évaporation, la vapeur est toujours appauvrie en isotopes lourds par rapport au liquide qui lui donne naissance. cela tient du fait que les molécules lourdes sont moins volatiles que les espèces légères.

Les enrichissements en isotopes lourds (^{18}O, ^{2}H) engendrés par l'évaporation ont un déterminisme complexe qui fait intervenir la température, la teneur en eau de l'atmosphère, la vitesse d'évaporation ainsi que la diffusion différentielle des molécules isotopiques dans l'air (**Craig** et **Cordon**, 1965; **Confiantini**, 1965; **Fontes** et **Confiantini**, 1967; **Gat**, 1970; **Merlivat**, 1970; **Zimmerman** et **Ehhalt**, 1970 in **Fontes**, 1976).

6.2.3.4. Les réactions d'échanges.

Certaines réactions d'échanges peuvent modifier les teneurs isotopiques de l'eau.

- Les réactions entre l'eau et les composés gazeux en grande abondance, CO_2 ou H_2S.

$$C^{16}O_2 + H_2{}^{18}O \text{ -----> } C^{18}O_2 + H_2{}^{16}O \qquad (6.6)$$

D'après **Fontes** (1976), la réaction (6.6) engendre un enrichissement du CO_2 en oxygène-18 de l'ordre de 40 ‰ à l'équilibre à 25 °C.

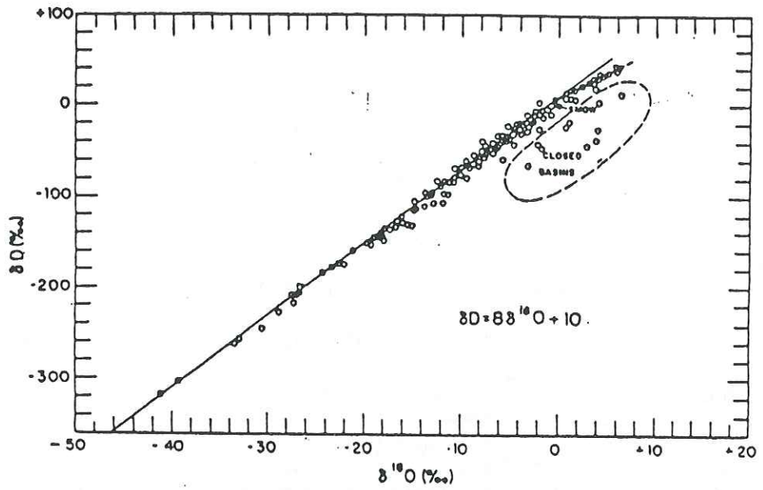
- Les échanges entre l'eau et les minéraux de l'encaissant. Ce phénomène ne prend vraiment de l'importance qu'aux hautes températures dans le cas des eaux thermales.

6.2.4. Relation comparée ^{18}O-^{2}H dans les eaux naturelles.

Craig (1961 in **Fontes**, 1976) a établi qu'à l'échelle mondiale, les teneurs en oxygène-18 et en deutérium des pluies qui n'ont pas subi d'évaporation sont corrélées linéairement suivant une équation appelée droite météorique mondiale (DMM) ou "droite de Craig" (figure 6.2) :

$$\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H = 8\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O + d \qquad (6.7)$$

d désigne "l'excés en deutérium"; il est égal à +10 °/$_{oo}$ pour les vapeurs d'origine océanique. La constante de la pente, 8, est spécifique du phénomène de la condensation qui intervient toujours à saturation et donc à l'équilibre.



Deuterium and oxygen-18 correlation in precipitation and surface waters. Closed basin waters do not fit the general linear correlation, because of evaporation. Points which fit the dashed line at the upper end of the curve are rivers and lakes from East Africa

Figure 6.2. Relation ^{18}O-^{2}H dans les précipitations et les eaux de surface (d'après **Craig**, 1961a in **Onugba**, 1990).

Pour l'Afrique et le Proche Orient, d est voisin de +15 °/$_{oo}$ (**Erikson**, 1983 in **Onugba**, 1990). Ceci traduit selon **Yurtsever** et **Gat** (in **AIEA**, 1981), une origine mixte : océanique et continentale pour la vapeur atmosphérique.

Le tableau 6.1 résume quelques équations des droites de regréssion ^{18}O et ^{2}H enregistrées par différents auteurs dans les eaux météoriques, les eaux de surface et les eaux souterraines de l'Afrique.

Tableau 6.1. - Relation ^{18}O et ^{2}H dans les eaux météoriques, les eaux de surface et les eaux souterraines de quelques régions d'Afrique.

Localité	Type d'eau	Relation oxygène-18/deutérium	Référence
Bamako (Mali)	eaux météoriques	$\delta o/oo2H=5,8\delta o/oo18O-0,9$	AIEA (1983 in Traoré, 1985)
Bassin de Sissili (Burkina Faso)		$\delta o/oo2H=8\delta o/oo18O+6,7$	Savadogo (1984)
Bande Sahélienne et Aïr (Niger)		$\delta o/oo2H=8\delta o/oo18O+10$	Ousmane et al (1983)
Sao Tomé		$\delta o/oo2H=6,38\delta o/oo18O+5,92$	AIEA (1981)
N'Djamena (Tchad)		$\delta o/oo2H=6,27\delta o/oo18O+4,16$	AIEA (1981)
Kano (Nigéria)		$\delta o/oo2H=6,20\delta o/oo18O-0,60$	AIEA (1981)
Plaine d'Accra (Ghana)		$\delta o/oo2H=7,86\delta o/oo18O+14$	Akiti (1980)
Lac Tchad	eaux de surface	$\delta o/oo2H=2,5\delta o/oo18O+1$	Fontes et al (1979)
Bolga Tanga (Ghana)	eaux souterraines	$\delta o/oo2H=5,14\delta o/oo18O-0,56$	Akiti (1980)
Continental terminal Paléocène et Maestrichien (Togo)		$\delta o/oo2H=7,35\delta o/oo18O+8,8$	Akiti (1980)
Ile-Ifé (Nigéria)		$\delta o/oo2H=5,9\delta o/oo18O+6,2$	Loehnert (1980 in Biemi, 1992)
Bassin du Talda (Maroc)		$\delta o/oo2H=5\delta o/oo18O-10$	Kabbaj A. (1978 in Biemi, 1992)
Bassin de le Mé et de la Marahoué (Côte d'Ivoire)		$\delta o/oo2H=8\delta o/oo18O+d$ $+6 < d < +17$	Sarrat Reynauld et al (1992)
Complexe terminal, El Hamma et Gabès (Tunisie)		$\delta o/oo2H=7,5\delta o/oo18O+1$	Gonfiantini et al (1974a)
Chott-El-Hodna (Algérie)		$\delta o/oo2H=8\delta o/oo18O+10$	Gonfiantini et al (1974b)

6.3. Présentation des résultats d'analyse des précipitations, et des eaux de surface.

A l'exception d'une analyse d'eau de pluie recoltée à Waza et de quelques prélèvements d'eau de surface effectués dans les Mayos Ranéo et Zina, dans le Logone, dans la retenue de Maga et une mare au Parc de Waza, notre domaine d'étude ne dispose pas de beaucoup de données sur les eaux de surface. Pour combler ces lacunes nous avons utilisé les données publiées par **Faure** et al (1970); **Fontes** et al (1970) ainsi que par l'**AIEA** (1981; 1983) à la station du réseau OMM-AIEA de N'Djamena.

6.3.1. Les eaux de pluies.

Faure et al (1970); **Fontes** et al (1970), ont observé qu'au Sud du lac Tchad, à Fort-Lamy (actuel N'Djamena), la composition isotopique (oxygène-18) des précipitations oscille de façon discontinue entre des valeurs de l'ordre de +2 pour mille vs SMOW à la fin avril (étiage) et -11 pour mille vs SMOW à la fin août (hautes eaux). Ces auteurs estiment que, compte tenu de la pluviosité, la valeur moyenne en oxygène-18 des précipitations peut être comprise entre -5 et -6 $^{o}/_{oo}$ vs SMOW pour la région du Sud du lac Tchad

D'après les mesures de **l'AIEA** (1981 in **Onugba**, 1990) faites de 1962 à 1978, les teneurs en oxygène-18 moyennes annuelles pondérées varie de +2,45 $^{o}/_{oo}$ à -6,65 $^{o}/_{oo}$ (écart de +9,10 $^{o}/_{oo}$) à N'Djamena. **Yurtsever** et **Gat** (in **AIEA**, 1981) attribuent ces variations à l'irrégularité des précipitations mensuelles et au fractionnement isotopique qui accompagne l'évaporation partielle de gouttes de pluies au cours de leur chute.

Les valeurs que nous avons obtenues pour les eaux de pluies cumulées (juin à septembre 1990) à la station climatologique de Waza sont de -3,23 $^{o}/_{oo}$ vs SMOW pour l'oxygène-18 et -19,4 $^{o}/_{oo}$ vs SMOW pour le deutérium.

Entre la teneur en oxygène-18 obtenue à Waza et la composition isotopique moyenne en oxygène-18 indiquée ci-dessus, on observe des écarts supérieurs à +3 $\delta^{o}/_{oo}$ vs SMOW. **Ces écarts peuvent provenir des averses exceptionnelles engendrées par des lignes de grains faiblement developpées ou par des masses d'air maritime condensées en une période relativement plus chaude que d'ordinaire.**

6.3.2. Les eaux de surface : cours d'eau et mares.

Dans le tableau 6.2 ci-dessous sont résumées les données disponibles sur les cours d'eau et les eaux stagnantes.

Tableau 6.2. Composition isotopique de quelques cours d'eau et mares du Grand Yaéré.

Localité	Oxygène-18	Deutérium	Date
Mayo Ranéo	-0,99	-4,7	avril 87
	-2,89	-16,0	septembre 89
	-2,65	-12,0	juin 90
	-3,00	-17,7	octobre 90
Mayo Zina	+8,81	+46,5	mars 91
Logone à Pouss	+0,61	+7,7	juin 90
	-2,96	-13,7	octobre 90
	+1,29	+3,6	avril 91
Retenue de Maga	+7,31	+39,6	avril 87
	+7,71	+40,8	juin 90
Mare (Parc de Waza)	+11,04	+50,3	avirl 87

Des prélèvements éffectués par l'**ORSTOM** en 1967/68 (in **Faure** et al, 1970) ont montré que la composition isotopique (oxygène-18) du Logone, à Kousséri, varie annuellement entre +1,5 et -5,5 $^{o}/_{oo}$ vs SMOW. Les valeurs minimales sont liées à la saison des pluies tandis que les valeurs maximales interviennent à la fin de la saison sèche. L'évolution des

compositions isotopiques du Logone, comparée à l'hydrogramme respectif (figure 6.3), montre une étroite analogie : la crue annuelle se manifeste par une diminution sensible de la teneur en isotopes lourds de l'eau du fleuve (**Fontes** et al, 1970).

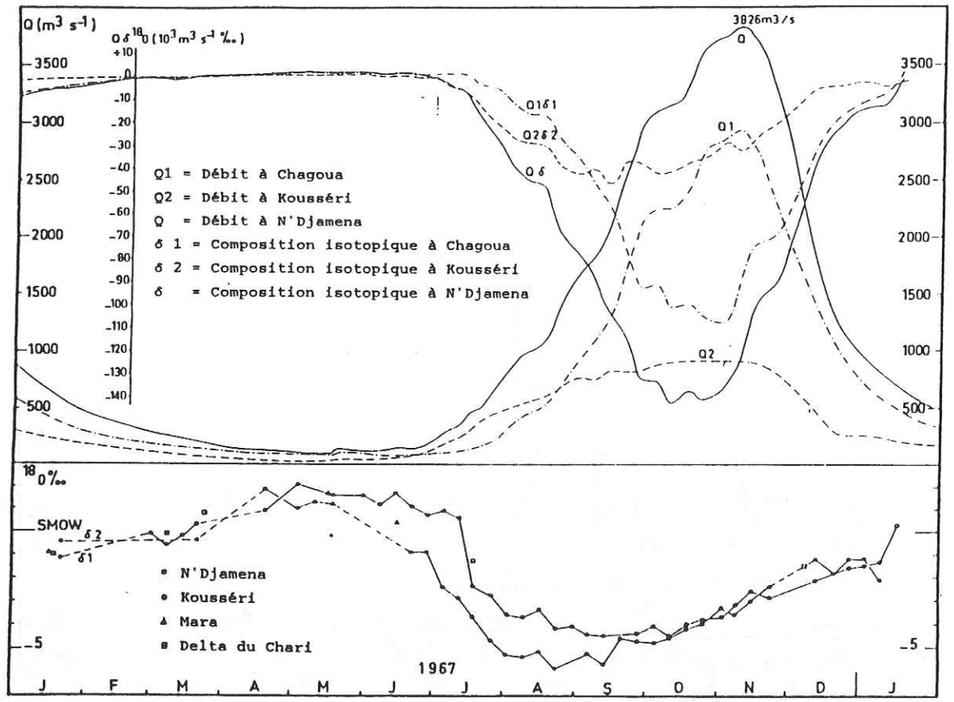


Figure 6.3. Variation de la composition isotopique hydrogramme débit et d'isotopes du Logone à Kousséri et du Chari à Chagoua et N'Djamena (d'après **Fontes** et al, 1970 complété).

Sur le Mayo Ranéo et sur le Logone à Pouss, les mesures que nous avons faites à différentes périodes donnent comme l'indique le tableau ci-dessus, des résultats comparables à ceux observés par **Faure** et al (1970).

Les mesures faites dans le Mayo Zina et dans les eaux stagnantes (mares et retenue de Maga) montrent des teneurs très enrichies en isotopes lourds. Ces valeurs sont comparables à celles du lac Tchad qui oscillent d'après **Faure**

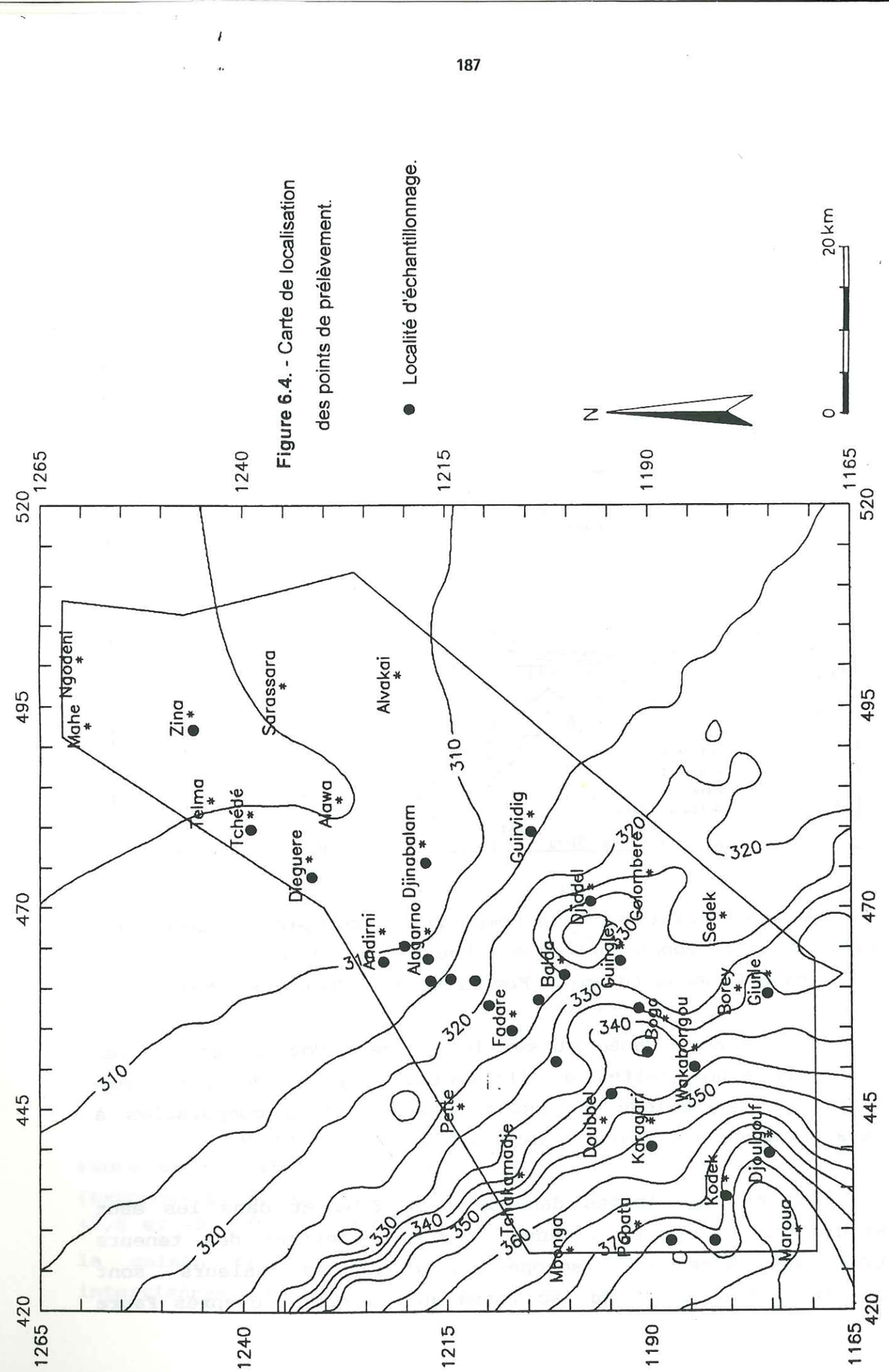


Figure 6.4. - Carte de localisation des points de prélèvement.

et al (1970) entre +2 et +6,5 $\delta^{O}/_{OO}$ vs SMOW à Bol et entre +9 et +16 $\delta^{O}/_{OO}$ vs SMOW à Karé-Katia.

Nous remarquons que, comparativement aux cours d'eau, les mares qui se trouvent en état stagnant, présentent un enrichissement en isotopes lourds, dû évidemment au processus d'évaporation. Les fortes teneurs du Logone en avril 91 et juin 1990 sont également liées à l'évaporation tandis qu'en octobre, l'appauvrissement traduit l'influence des eaux de précipitation. Pour le Mayo Ranéo, on observe une variation entre la valeur d'avril et celles de juin à octobre; l'enrichissement de l'eau en avril serait lié soit à la sécheresse qui a été sévère en 1987, soit à la faiblesse de la pluie en ce mois où, l'évaporation a encore une influence prépondérante.

A la suite de Faure et al (1970), ces résultats indiquent que toute recharge actuelle des nappes superficielles par les rivières se fait avec une eau de composition isotopique comprise dans l'intervalle de variation des différentes teneurs présentées ci-dessus. La période de recharge devant coïncider avec celles des crues du mois d'août (comme nous le verrons dans le chapitre 8), **ce sont les valeurs les plus négatives correspondantes qui doivent être rapportées à l'alimentation des nappes liées aux inféro-flux et aux crues des mayos et du Logone.**

6.4. Interprétation des résultats d'analyse des eaux souterraines du périmètre étudié.

6.4.1. Echantillonnage et analyses.

Les données qui sont exploitées proviennent de 4 campagnes de prélèvement (septembre-octobre 1989, juin 1990, octobre 1990 et mars-avril 1991) qui se regroupent en deux cycles hydrologiques (juin 1989 à mai 1991). A ces données s'ajoutent quelques analyses dont les prélèvements ont été faits par **Naah** et **Aranyossy** en avril 1987. Les points de

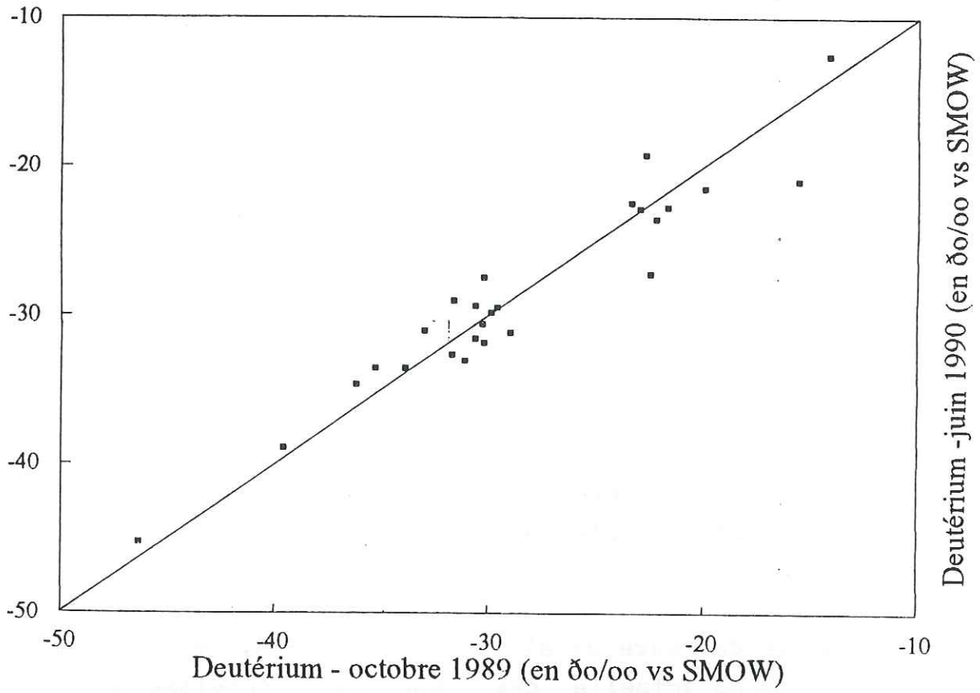


Figure 6.5. - Relation deutérium (octobre 1989)/deutérium (juin 1990).

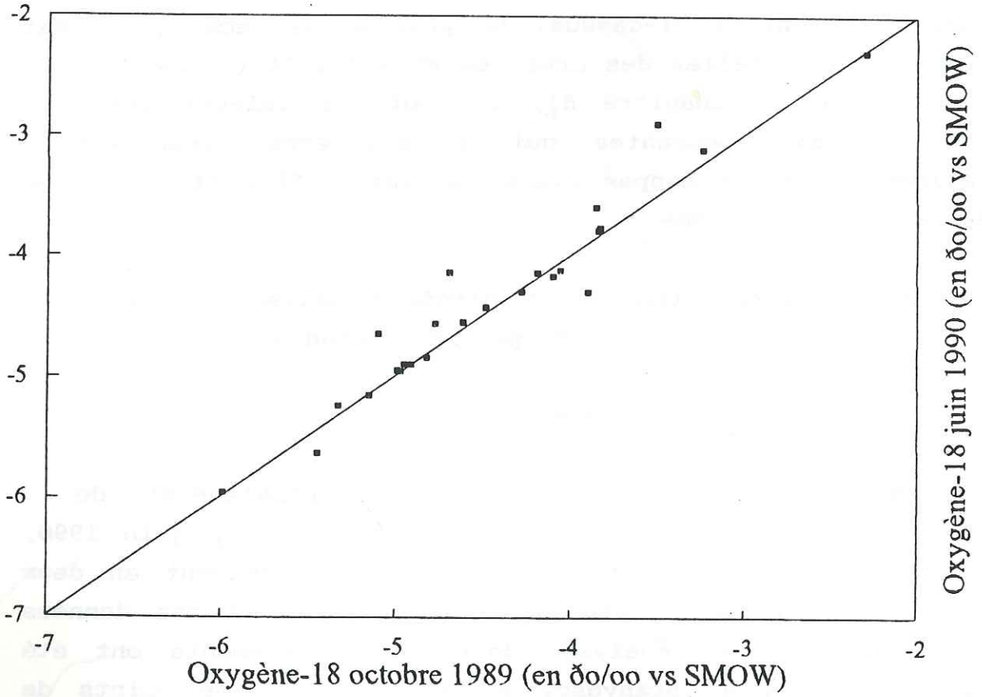


Figure 6.6. - Relation oxygène-18 (octobre 1989)/oxygène-18 (juin 1990).

prélèvement étaient surtout les forages équipés de pompes à motricité humaine et quelques puits modernes (figure 6.4).

La technique d'échantillonnage a consisté à faire des prélèvements à des périodes d'étiage (mars-juin) et de hautes eaux (septembre-novembre) sur tous les points d'eau sélectionnés et accessibles. Les prélèvements ont été faits en vue de la mesure des teneurs en oxygène-18, deutérium et tritium.

Toutes les eaux prélevées ont été analysées à Vienne en Autriche par le Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (**A.I.E.A.**) dans le cadre du projet **CMR/8/002**. Les résultats sont consignés dans le tableau A6.1 en annexe 4.

6.4.2. Teneurs en isotopes lourds (^{18}O et ^{2}H). Origine et genèse des eaux souterraines du périmètre étudié.

6.4.2.1. Evolution des teneurs en isotopes lourds dans le temps.

La comparaison des isotopes stables des eaux collectées à environ 7 mois d'intervalle (octobre 1989 et juin 1990) dans les deux systèmes aquifères (piémont et Yaéré), montre que les eaux prélevées en étiage et en hautes eaux sont assez **homogènes dans le temps en chaque point des aquifères** : toutes les valeurs sont situées approximativement sur une même droite de pente 1 (figures 6.5 et 6.6). Compte tenu de cette stabilité des eaux dans le temps, les résultats obtenus en étiage et hautes eaux ont été traités ensemble.

6.4.2.2. Distribution des teneurs en isotopes lourds.

La carte de répartition géographique de la composition moyenne en isotope lourds des aquifères du Quaternaire, dans les limites du périmètre étudié est présentée sur la figure 6.7.

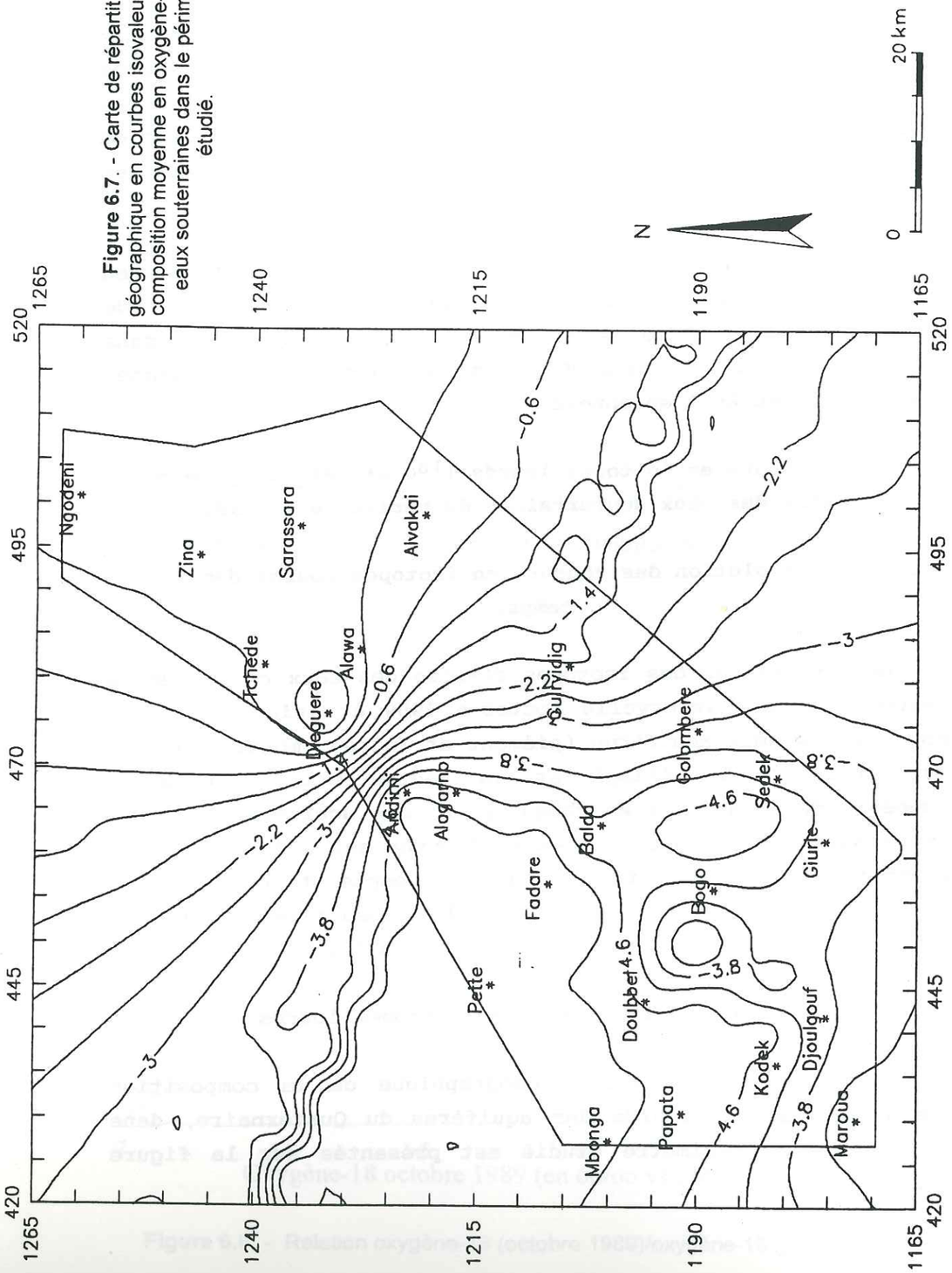


Figure 6.7. - Carte de répartition géographique en courbes isovaleurs de la composition moyenne en oxygène-18 des eaux souterraines dans le périmètre étudié.

i) - Système aquifère du piémont.

Les teneurs en oxygène-18 sont comprises entre -2,75 et -5,57 $\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O$ vs SMOW (figure 6.8) et les teneurs en deutérium entre -14,1 et -36,6 $\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H$ vs SMOW (figure 6.9). Les teneurs moyennes sont respectivement de -4,35 et -27,29. Dans les deux cas, le coefficient de variation est très faible, inférieur à 20 %, ce qui montre que les valeurs ne sont pas dispersées ou discontinues. Plus de 75 % des points d'eau ont des teneurs en oxygène-18 comprises entre -3,88 et -5,57 $\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O$ vs SMOW.

ii) - Système aquifère du Quaternaire des Yaérés.

Dans les histogrammes de distribution des teneurs en oxygène-18 (figure 6.10) et en deutérium (figure 6.11), les données se répartissent en trois groupes bien distincts :

- le premier groupe est caractérisé par des teneurs en oxygène-18 de -5,35 à -4 $\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O$ vs SMOW et des teneurs en deutérium de -36,4 à -25 $\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H$ vs SMOW. Ce groupe correspond aux eaux des niveaux aquifères profonds;

- le second groupe, un peu discontinu pour la composition en oxygène-18, correspond à l'échantillonnage de Guirvidig et de Zina. Les teneurs en isotopes lourds sont comprises entre -3 et -1,7 $\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O$ vs SMOW, et entre -20 et -15 $\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H$ vs SMOW;

- le troisième groupe, présente des teneurs en isotopes lourds plus enrichies que les deux précédents. Ce groupe représente les points d'eau de Tchédé et de Diéguéré. Leurs teneurs en isotopes lourds varient de -0,51 à +0,77 $\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O$ vs SMOW pour l'oxygène-18 et de -7,4 à -3,6 $\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H$ vs SMOW pour le deutérium.

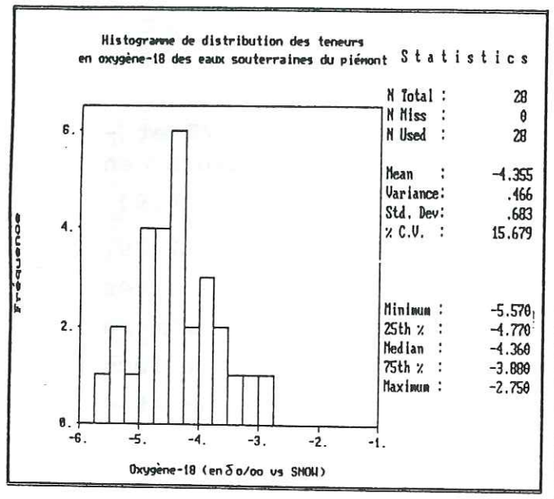


Figure 6.8.

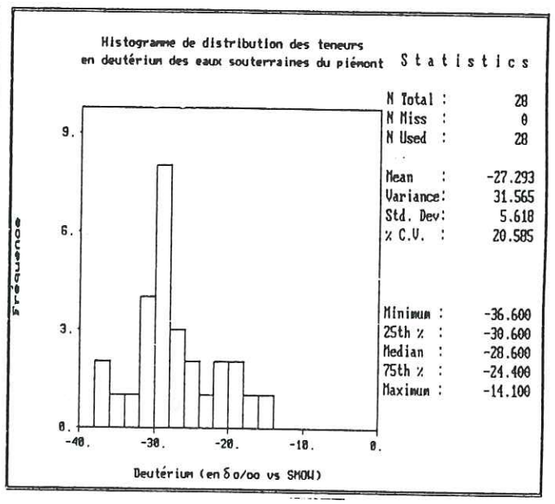


Figure 6.9.

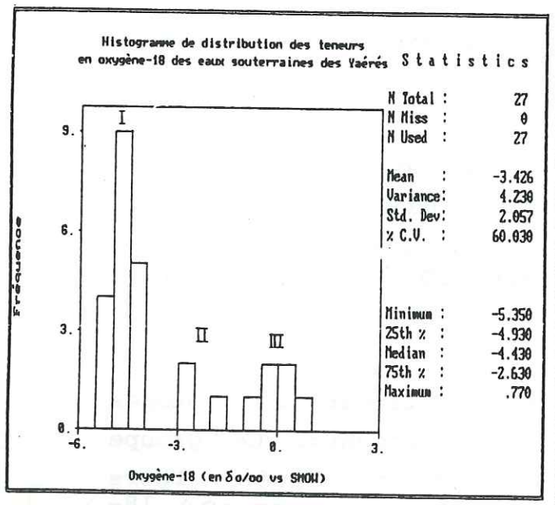


Figure 6.10.

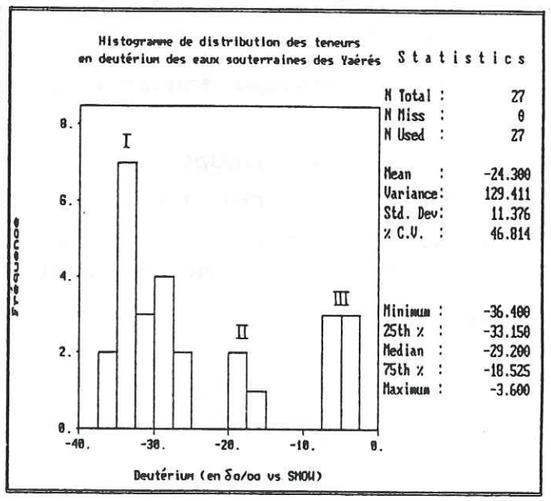


Figure 6.11.

Le second groupe et le troisième correspondent aux eaux des niveaux aquifères superficiels. Le coefficient de variation des teneurs en oxygène-18 est assez significatif (60 %) : la discontinuité des valeurs suggère comme nous allons le voir dans le diagramme $^{18}O/^{2}H$, des origines diverses de la recharge des nappes superficielles.

6.4.2.3. Relation oxygène-18/deutérium.

i) - <u>Système aquifère du piémont</u>.

Pour les eaux souterraines du piémont, les corrélations entre $^{2}H/^{18}O$ restent linéaires, la droite de regression présente une pente proche de 8 mais, un excès en deutérium plus faible que celui de la droite météorique (figure 6.12) :

$$\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H = 7{,}89\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O + 7{,}1 \quad n = 28 \quad r^{2} = 0{,}89 \qquad (6.8)$$

La présence d'un excès en deudérium inférieur à 10, traduit le caractère relativement évaporé des eaux de la nappe. La comparaison de la composition en oxygène-18 moyenne des eaux souterraines avec celle du Mayo Ranéo (cf. tableau 6.2) démontre que si l'évaporation affectait les eaux souterraines, elle se produirait au cours de l'infiltration. Cependant, la composition en oxygène-18 moyenne des eaux souterraines étant très proche de celle qui est supposée pour les précipitations dans la région, **tout se passe comme si l'évaporation au cours de l'infiltration est peu importante ou même absente, ce qui implique que la recharge est rapide.**

ii) - <u>Système aquifère du Quaternaire des Yaérés</u>.

Sur le diagramme oxygène-18/deutérium (figure 6.13), les eaux du groupe I s'alignent sur une droite sensiblement parallèle à celle de Craig. Ces eaux ne sont pas marquées par l'effet d'évaporation comme nous le verrons dans le chapitre 7. Leurs teneurs en oxygène-18 correspondent à celles des eaux souterraines du piémont et également à celles des

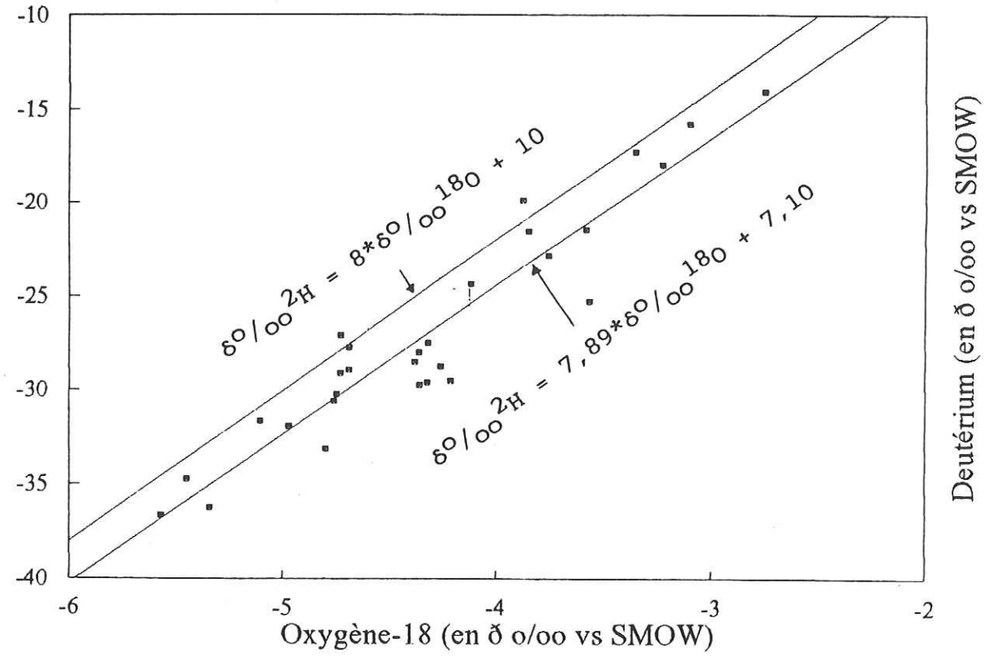


Figure 6.12. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux du système aquifère du piémont.

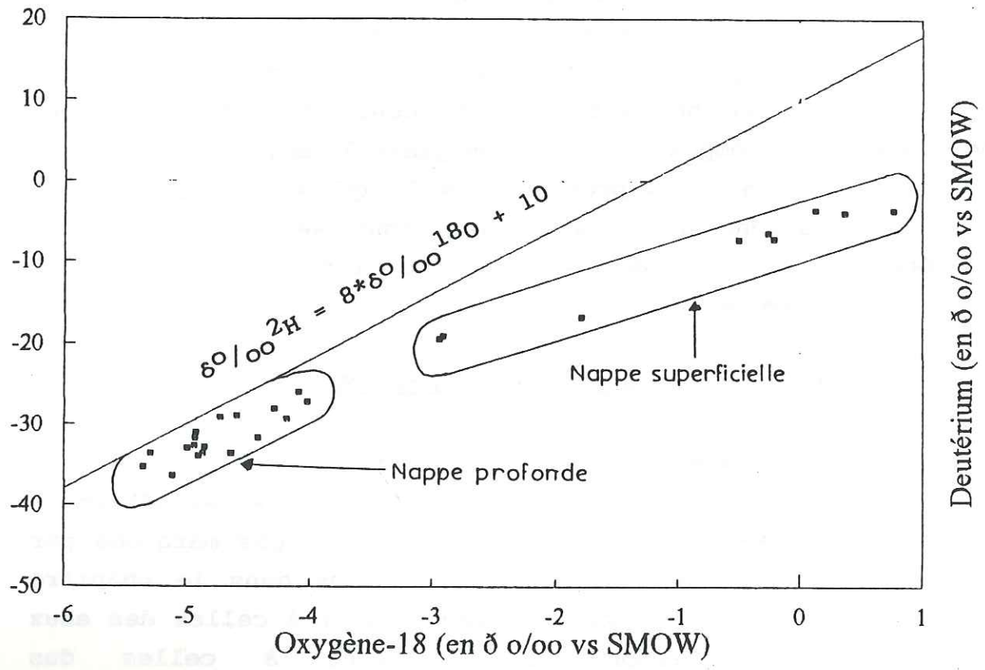


Figure 6.13. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux du système aquifère du Quaternaire des Yaérés.

précipitations actuelles ou récentes. **Au regard de la coupe 3 (cf. figure 4.8), l'hypothèse de la recharge de ces eaux à partir du cordon sableux Limani-Yagoua et des niveaux altérés du piémont, nous semble assez logique.**

Les eaux des groupes II et III s'alignent sur une droite de pente inférieure à celle des eaux météoriques mondiales, ce qui démontre leurs enrichissements par évaporation.

$$\delta^{\circ}/_{oo}{}^{2}H = 4{,}75\,\delta^{\circ}/_{oo}{}^{18}O - 5{,}85 \quad n = 9 \qquad r^2 = 0{,}96 \quad (6.9)$$

En dehors des nappes perchées comme nous le verrons dans le chapitre 7, **la relation (6.9) montre que la recharge des nappes superficielles des Yaérés ne se fait pas à partir des précipitations directes.**

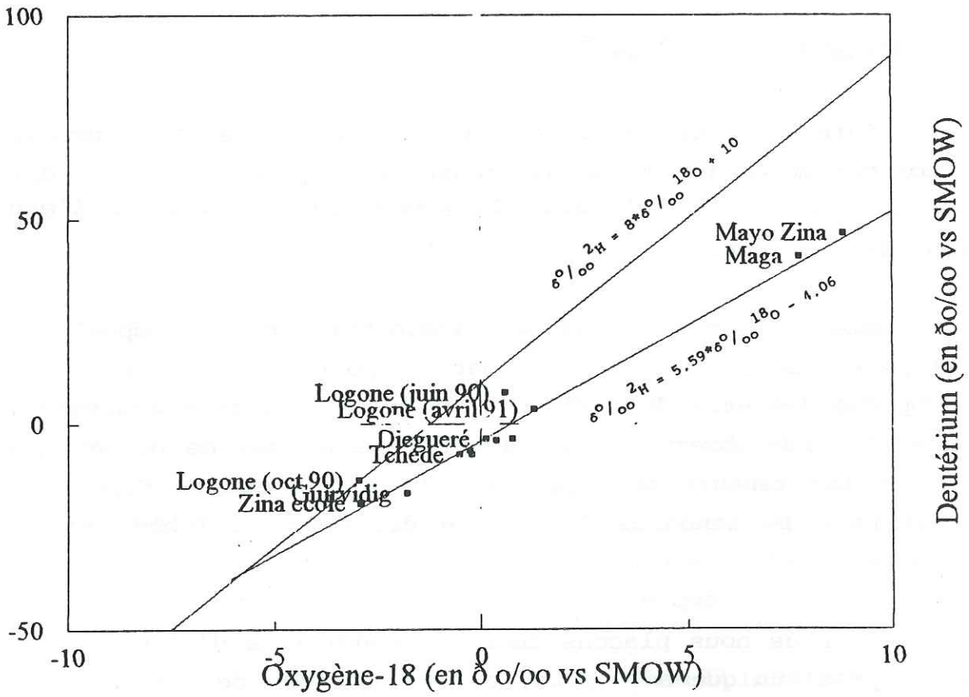


Figure 6.14. Relation oxygène-18/deutérium des eaux des niveaux superficiels des Yaérés et des eaux de surface (cours d'eau et mares).

L'enrichissement des eaux des niveaux superficiels des Yaérés est d'importance pour déceler une éventuelle recharge des nappes à partir des cours d'eau (Mayo ou Logone) et/ou des eaux d'inondation (mares). Dans le but de comparer les teneurs isotopiques des eaux souterraines et des eaux de surface, nous avons représenté sur un même diagramme les teneurs des points d'eau de Diéguéré, Guirvidig, Tchédé et Zina, et, celles du Logone à Pouss, du Mayo Zina et de la retenue de Maga (figure 6.14).

On observe sur cette figure, une très bonne corrélation entre les points d'eau, l'eau du Mayo et celle de la retenue. Les eaux du Logone de juin 90 et d'octobre 90 ne sont pas en relation avec les autres points. La droite obtenue a pour expression :

$$\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H = 5{,}59\,\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O - 4{,}06 \quad n = 10 \quad r^2 = 0{,}98 \quad (6.10)$$

L'intersection de la droite (6.10) avec la droite météorique mondiale, donne une teneur en oxygène-18 de l'ordre de -5,8 $\delta^{o}/_{oo}$ vs SMOW, qui est probablement celle de l'eau avant évaporation.

Comme on peut le constater, l'évolution de la composition isotopique des points d'eau par rapport à la composition isotopique des eaux de surface n'est pas évidente à expliquer. Toutefois, les observations suivantes permettent de penser que ce sont les teneurs en oxygène-18 des mares et des Mayos qui déterminent la tendance isotopique des eaux de Tchédé et de Diéguéré :

- si nous nous plaçons dans les conditions d'alimentation des nappes uniquement pendant la période de crue, nous remarquons qu'à partir de la teneur en oxygène-18 de l'eau de pluie avant évaporation et de celles des eaux du Mayo Zina ou de la retenue de Maga, on peut obtenir des eaux de mélange

dont les teneurs en oxygène-18 sont relativement proches de celles de Diéguéré et Tchédé;

- les eaux des nappes perchées du secteur de Waza qui ne bénéficient pas d'un recouvrement argileux ont des teneurs en oxygène-18 plus appauvries que celles de Tchédé et Diéguéré. Malgré l'écart qui existe entre les valeurs des eaux des mares et des points d'eau de Tchédé et de Diéguéré, d'un point de vue général, les teneurs en isotopes lourds les plus enrichies se rapportent davantage aux eaux qui sont en état stagnant que le Logone qui est en écoulement permanent.

A la suite des observations précédentes, et compte tenu : des résultats de l'étude piézométrique et de l'analyse chimique, la recharge des nappes superficielles apparaît comme dépendant des Mayos et des mares. Dans ces conditions, les variations des teneurs en isotopes lourds observées, peuvent résulter du mélange entre les deux types d'eaux. Toutefois, des séries de prélèvement et d'analyse complémentaires s'avèrent necessaires pour conforter cette hypothèse.

6.4.3. Tritium et approche des temps de séjour des eaux souterraines du périmètre choisi.

6.4.3.1. Distribution des teneurs en tritium.

Dans l'ensemble des deux bassins hydrogéologiques, les activités en tritium présentent une évolution assez significative dans le temps : des échantillons prélevés avec 4 à 6 mois d'intervalle seulement montrent des variations de teneurs dans la plupart des points d'eau. L'analyse des résultats par bassin hydrogéologique montre que :

- dans le piémont, sur un total de 22 analyses, les teneurs en tritium varient entre 0,1 et 28,80 UT. Plus de 75 % des mesures ont une activité tritium inférieure à 12 UT. Le coefficient de variation est très élevé (figure 6.15). Les activités en tritium des points d'eau de Balaza (11,2 UT),

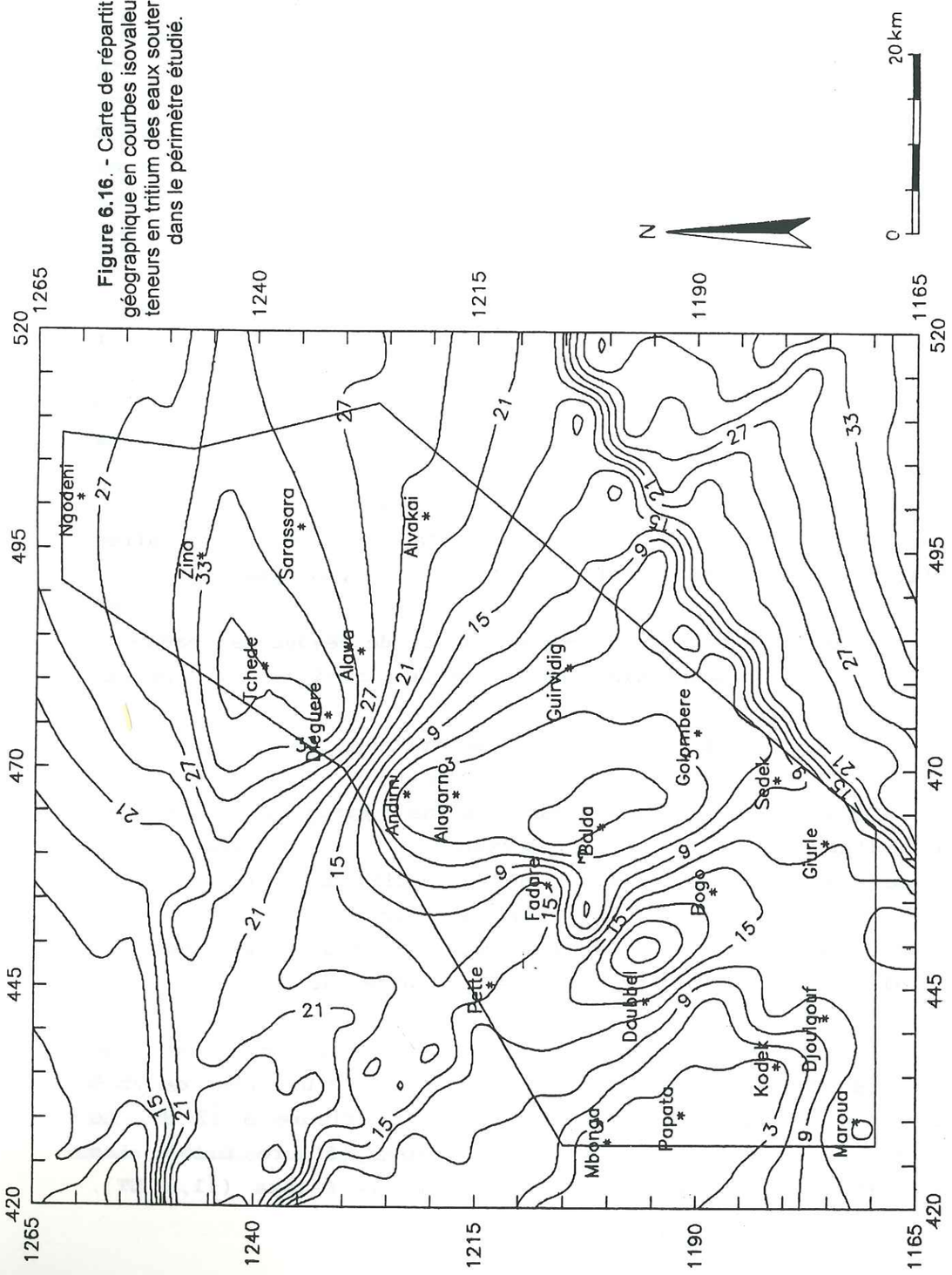


Figure 6.16. - Carte de répartition géographique en courbes isovaleurs des teneurs en tritium des eaux souterraines dans le périmètre étudié.

Diguir (12,89 UT), Madaka (28,8 UT) confortent l'hypothèse, de l'alimentation des nappes à partir du Mayo Tsanaga (dans le voisinage de Bogo), suggérée par la carte piézométrique et la carte d'isoconductivités. Les niveaux altérés (axe Maroua-Papata) contrairement aux niveaux profonds des Yaérés ont des eaux plus tritiées; toutefois, les teneurs restent inférieures à 4 UT (figure 6.16);

- dans le Yaéré, les teneurs en tritium sont comprises entre 0,1 et 48,86 UT (figure 6.17). Le coefficient de variation est largement supérieur à 100 %, ce qui traduit la discontinuité ou la dispersion des valeurs. Les faibles teneurs (^3H < 4 UT) correspondent aux niveaux aquifères profonds et les fortes teneurs aux niveaux aquifères superficiels. Comparativement au domaine du piémont, le Yaéré renferme les points d'eau les plus pauvres en tritium, mais aussi les points d'eau les plus riches.

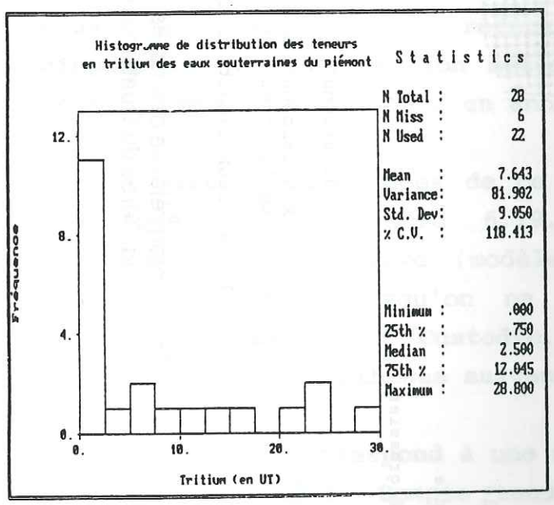


Figure 6.15.

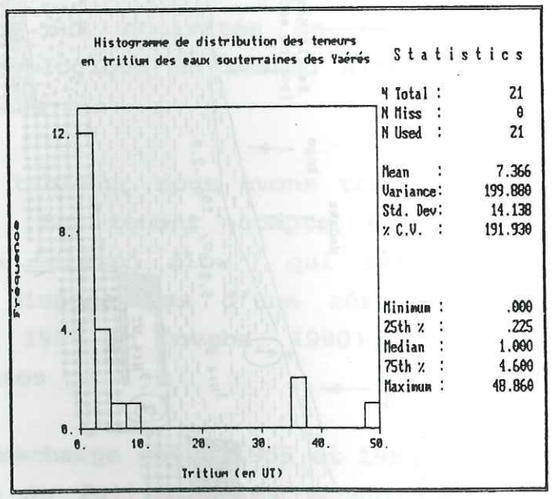


Figure 6.17.

La distribution verticale des teneurs en tritium dans le Yaéré est confirmée par les isotopes stables, ce qui suggère une superposition ou une stratification des eaux souterraines.

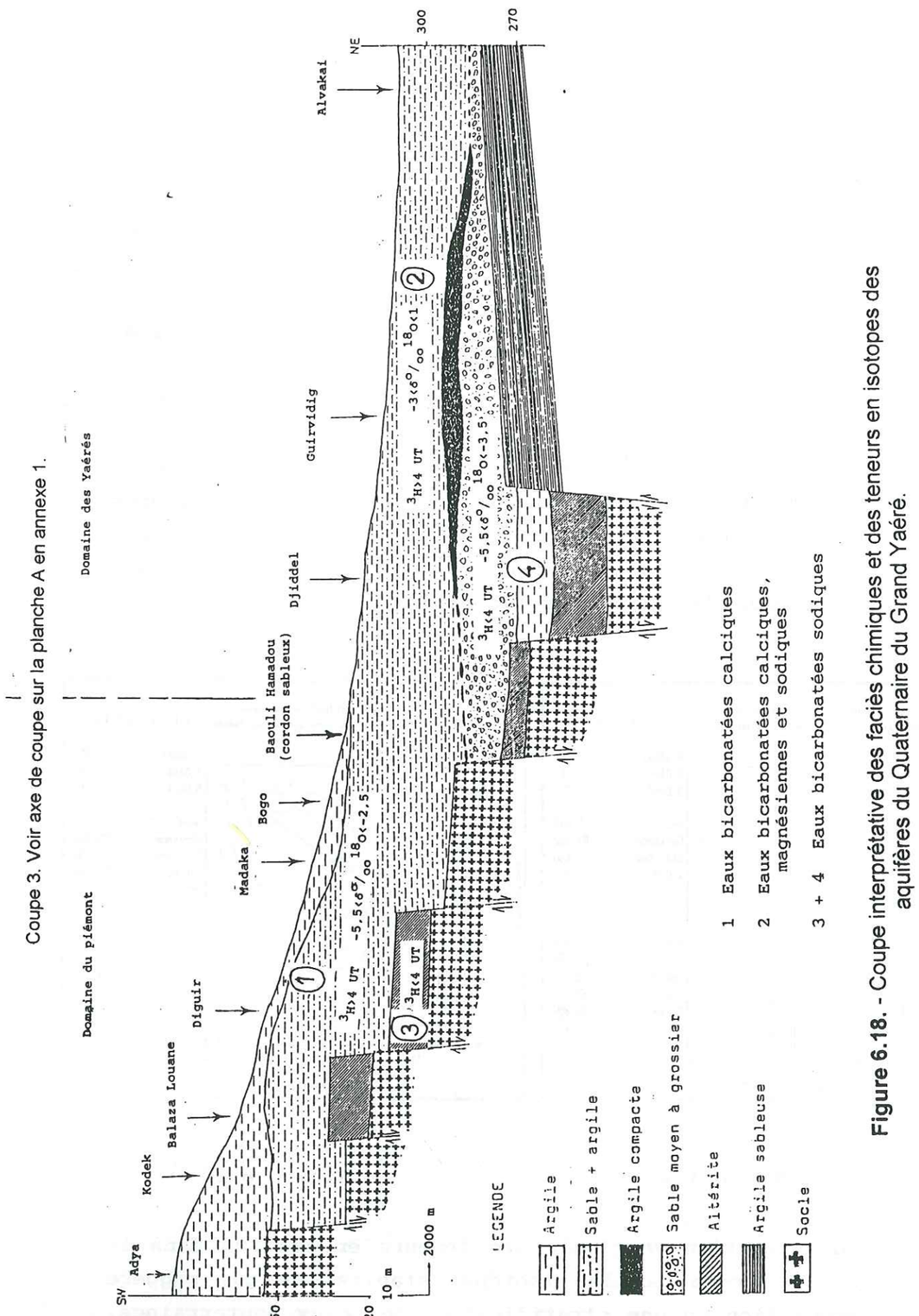


Figure 6.18. - Coupe interprétative des faciès chimiques et des teneurs en isotopes des aquifères du Quaternaire du Grand Yaéré.

Cette zonalité verticale concorde de façon remarquable avec les coupes géologiques qui ont montré que dans ce bassin, il existe deux niveaux aquifères distincts séparés par une couche d'argile compacte. De plus, elle corrobore les résultats de la chimie : les eaux des niveaux profonds sont bicarbonatées sodiques, tandis que les eaux riches en tritium appartiennent à la famille des eaux bicarbonatées calciques (figure 6.18).

6.4.3.2. Estimation des temps de séjour et de renouvellement des eaux souterraines.

L'estimation précise des périodes de recharge des eaux souterraines d'une région, n'est aisée que si l'on dispose pour cette région, des chroniques de teneur en tritium des précipitations (signal d'entrée) permettant de faire des hypothèses sur le mode de circulation de l'eau à l'intérieur de l'aquifère. La teneur en tritium de 10,4 UT obtenue à Waza, pour les pluies cumulées des mois de juin à septembre 1990, n'étant pas suffisante pour situer le temps de séjour de nos eaux, nous allons nous référer aux activités en tritium disponibles sur la station météorologique du réseau AIEA/OMM de N'Djamena (tableau A6.2 en annexe 4).

A partir des données de ce tableau, nous avons tracé le graphique de la figure 6.19. En tenant compte de la décroissance radioactive (modèle "piston flow") qui est la plus recommandée lorsqu'on ne dispose pas d'une série de données (**Fontes**, 1985; **Custodio**, 1989 in **Onugba**, 1990), nous aboutissons aux hypothèses suivantes :

- ^3H > 4 UT corespond à une recharge entre 1955 et 1953 ou postérieure à 1983. Compte tenu du fait que les teneurs en tritium supérieures à 4 UT résultent d'une alimentation des aquifères à partir des précipitations directes et/ou en liaison avec les alluvions des cours d'eau qui sont caractérisées par une bonne perméabilité, une recharge se rapportant aux dix dernières années est la plus plaussible. Ce

sont donc des eaux actuelles, qui indiquent une circulation rapide dans les premiers mètres des niveaux aquifères;

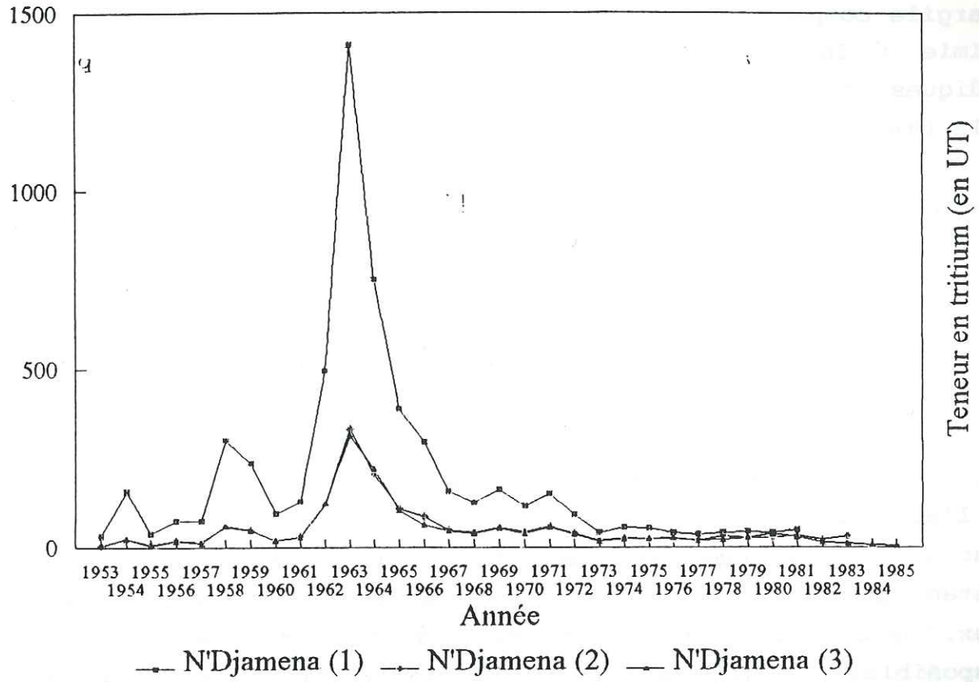


Figure 6.19. Chronique des teneurs en tritium dans les pluies à N'Djamena (1953-1985).

- ^3H < 4 UT correspond à une recharge antérieure à 1953, ce qui représente à un temps de séjour de plus de 40 ans. Les eaux de ce groupe (eaux des niveaux profonds), peu tritiées, sont caractérisées par un faciès chimique qui résulte de l'échange ionique à partir des eaux des niveaux superficiels. **L'eau des niveaux profonds est donc en étroite relation avec l'eau superficielle, ce qui témoigne qu'il y a échange entre les deux niveaux et par conséquent renouvellement des eaux.** Par ailleurs, **les teneurs en isotopes lourds des eaux profondes des Yaérés, sont compatibles avec une alimentation notable par les eaux du système aquifère du Piémont.**

Cependant, les circulations d'eaux (figure 6.20) dans les altérites et/ou les argiles étant lentes en raison de leurs faibles perméabilités, il apparait que les niveaux altérés du piémont et les nappes profondes des Yaérés, sous recrouvrement altéritique ou argileux, qui ne bénéficiéraient pas d'apports latéraux, se rechargent difficilement ou très lentement, ce qui se traduit dans ces réservoirs par l'absence d'eaux actuelles ou la présence d'eaux non tritiées. Suite à ces observations, **l'hypothèse de la présence dans ces réservoirs d'eaux récentes plutôt que fossiles nous semble la plus logique.**

6.5. Conclusion.

La droite de régression des eaux en étiage et en hautes eaux suggère la stabilité des masses d'eaux dans le temps, ce qui indique une même origine des eaux de recharge dans les deux cas. **La période de recharge coïncide avec celle des crues. Ainsi, ce sont surtout les compositions isotopiques du mois d'août qui doivent être rapportées à la recharge des nappes.**

Le parallélisme entre la droite des eaux météoriques mondiales et celles des nappes du piémont montre que la recharge des nappes se fait par infiltration directe des précipitations.

Les fortes variations des teneurs en oxygène-18 des points d'eau de Tchédé et de Diéguéré suggèrent que **les eaux de ces ouvrages ont subi divers mécanismes tels que l'évaporation avant la recharge à partir des eaux des mares et/ou le mélange entre des masses d'eau (mares et cours d'eau) dont les teneurs en isotopes lourds sont différentes.**

Les niveaux aquifères superficiels sont caractérisés par des eaux actuelles (^3H > 4 UT) et les niveaux profonds par des eaux récentes (^3H < 4 UT).

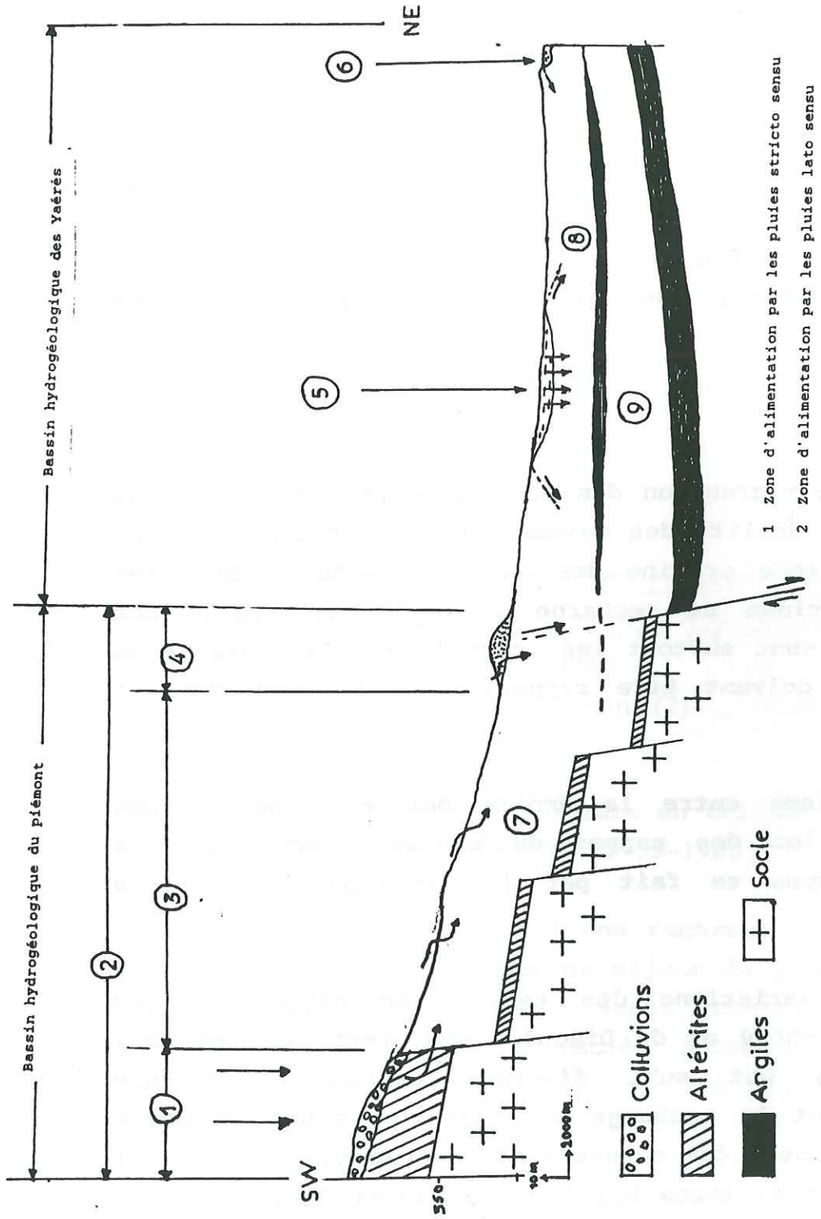


Figure 6.20. - Schéma de circulations souterraines dans les aquifères du Quaternaires du Grand Yaéré.

La présence des teneurs en tritium hautement significatives dans le secteur de Bogo, confortée par la carte piézométrique et la carte d'isoconductivités **fait apparaître que les cours d'eau contribuent à la recharge des nappes**, ce qui n'est pas perceptible par simple comparaison des teneurs en isotopes lourds des eaux souterraines et des eaux de surface.

Dans le bassin hydrogéologique des Yaérés, l'écart observé entre les teneurs en tritium des niveaux superficiels et ceux des niveaux profonds d'une part, et l'évolution des faciès chimiques (passage des eaux bicarbonatées calciques vers les eaux bicarbonatées sodiques) d'autre part, confortée par le diagramme $^{18}O/^{2}H$, **confirment l'existence de la couche d'argile semi-perméable mise en évidence par les coupes géologiques et par conséquent la présence dans ce secteur d'un aquifère de type bicouche.**

La recharge des nappes à partir des précipitations directes ainsi que des cours d'eau et éventuellement des eaux stagnantes démontre que les conditions d'infiltration sont variables. Il reste à quantifier les différents termes de recharge dans les ressources en eau des aquifères du Quaternaire.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

01 SEP. 2003

TROISIEME PARTIE

ELEMENTS DE GESTION DES SYSTEMES AQUIFERES DU GRAND YAERE.

"La gestion et la protection des eaux souterraines ne sont pas l'affaire des seuls hydrogéologues. Il leur appartient bien, certes, d'analyser les potentialités offertes et les contraintes imposées par les conditions physiques du milieu naturel, de prévoir et de démontrer les conséquences de multiples actions humaines sur l'eau souterraine, de formuler et proposer les modalités techniques les plus capables d'atteindre les objectifs voulus en cette matière. Cependant, les finalités de la gestion et de la protection des eaux souterraines -comme de celles de toutes les eaux- ainsi que les voies et moyens appropriés à ces fins dépendent des points de vue et des objectifs de bien d'autres acteurs et décideurs. Autant les hydrogéologues peuvent contribuer à éclairer la compréhension des problèmes par ces nombreuses parties prenantes et les prises de décision à différents niveaux, autant ils doivent eux-mêmes comprendre les aspects techniques qui entrent en jeu."

MARGAT Jean. Défense et illustration des eaux souterraines en Europe.

Chapitre 7. PROBLEME DU CORDON SABLEUX ET DES ANOMALIES PIEZOMETRIQUES.

Chapitre 8. EVALUATION DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES.

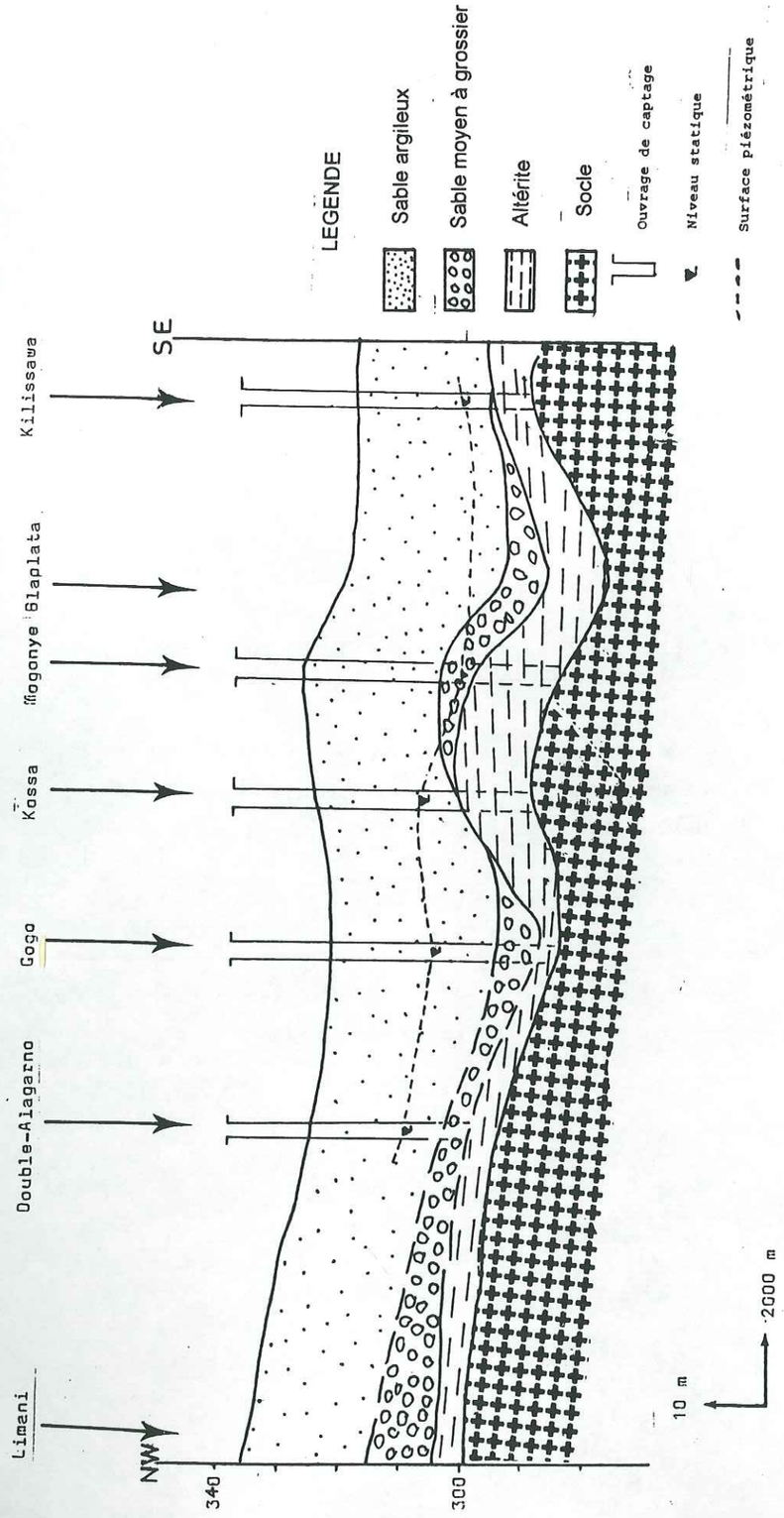
Chapitre 9. POSSIBILITES DE DEVELOPPEMENT DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES.

Chapitre 7. PROBLEME DU CORDON SABLEUX ET DES ANOMALIES PIEZOMETRIQUES.

7.1. Introduction.

7.2. Problème du cordon sableux Limani-Yagoua.

7.3. Problème des anomalies piézométriques.



Coupe 4. Voir axe de coupe sur la planche A en annexe 1.

Figure 7.1. - Coupe géologique et hydrogéologique le long du cordon sableux de Limani à Kilissawa (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

7.1. Introduction.

Au cours de l'étude du comportement et/ou du fonctionnement des systèmes aquifères du Quaternaire, nous avons remarqué que les problèmes des circulations dans le cordon sableux et des anomalies piézométriques existent mais demeurent encore du domaine des hypothèses. Nous allons pour chacun de ces problèmes, examiner les hypothèses qui sont aujourd'hui admises, puis exposer les résultats de nos investigations.

7.2. Problème du cordon sableux Limani-Yagoua.

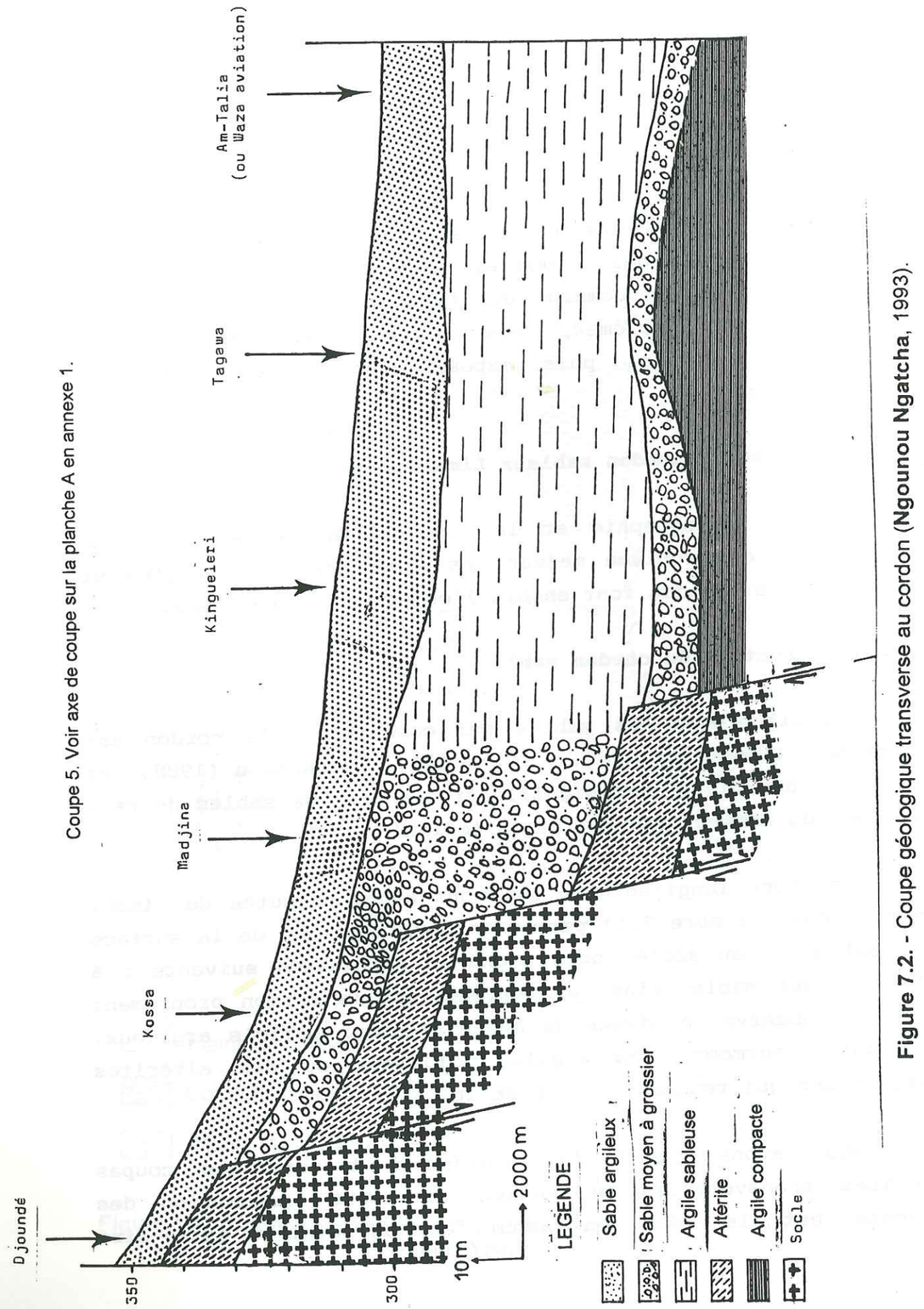
Si la cartographie et la composition de ce cordon ne posent pas de problème majeur, sa structure, son origine et son rôle hydraulique font encore l'objet de controverses.

7.2.1. Structure du cordon sableux.

la lithologie des sables qui constituent le cordon est complexe. **Schwoerer** (1965) ; **Pias** (1970) ; **Wakponou** (1988) ont souligné une différence significative entre les sables de base et ceux du sommet (fluviatile ou éolien).

La coupe longitudinale que nous avons exécutée de Limani à Kilissawa (figure 7.1) permet de constater que de la surface du sol jusqu'au socle, nous avons la succession suivante : à la base des sables fins qui représentent le cordon proprement dit, on observe un niveau de sable grossier parfois argileux. Ce sable surmonte des argiles sableuses ou des altérites argileuses qui reposent sur le socle.

Nous avons essayé de regarder à travers des coupes sériées transversales au cordon, si cette disposition des dépôts est la même en amont et en aval c'est-à-dire



Coupe 5. Voir axe de coupe sur la planche A en annexe 1.

Figure 7.2. - Coupe géologique transverse au cordon (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

respectivement dans la plaine de piémont et la plaine des Yaérés. Nous remarquons que :

- en amont, le niveau de sable fin disparait rapidement et il ne subsiste que des argiles, des sables fins argileux ou des argiles sableuses. La série sableuse grossière est conservée. Ceci pourrait conforter l'hypothèse selon laquelle le niveau grossier provient de l'altération du socle;

- en aval, on observe la même chose jusqu'à une distance de 5 à 10 km environ. Au delà, des variations de faciès s'observent à divers niveaux. La coupe 4 (figure 7.2) exécutée dans l'axe Djoundé-Am Talia ou Waza aviation, nous permet de noter un passage latéral de faciès; passage des sables grossiers aux argiles ou aux argiles sableuses. En dessous de ces argiles, on observe des sables moins grossiers et plus fins que ceux rencontrés en amont. Ces sables qui surmontent la série argileuse plio-pléistocène sont attribués au Quaternaire ancien. Entre Madjina et Tagawa, cette série offre l'aspect d'un dépôt de cuvette. Cela est perceptible à la surface du sol où la structure favorise les accumulations d'eau de surface sous forme de mares.

La figure 7.2 permet d'observer des différences dans l'évolution sédimentologique en amont et en aval du cordon. En aval, les dépôts sédimentaire reposent dans un fossé d'effondrement; le fossé de NGODENI (cf. figure 1.11). L'effondrement aurait favorisé l'apport de sédiments lacustres, ce qui se traduit sur la figure 7.2 par un passage latéral de faciès.

7.2.2. Origine structurale des cordons sableux.

Actuellement, deux hypothèses sont largement débattues sur l'origine des cordons sableux dans la cuvette tchadienne en général, et dans le Grand Yaéré en particulier. Pour les uns, il s'agit d'anciens rivages d'un grand lac holocène (entre 6000 et 5000 ans BP) culminant à la cote 320 m. Cette

hypothèse a été soutenue dans les travaux **Pias** (1962; 1970), **Schneider** (1970), entre autres.

Pour les autres, les cordons sableux représentent la trace d'accidents tectoniques anciens rejouant dans la couverture superficielle. **Notre objectif est de rassembler tous les renseignements qui penchent en faveur de cette hypothèse** : elle est renforcée par les phénomènes néotectoniques déduits de l'analyse géomorphologique, sédimentologique, paléogéographique, paléohydrologique, paléoclimatique des cordons. Il s'agit notamment :

- de l'absence de dépôts lacustres élevés vers 6000 ans BP. **Durand** et **Mathieu** (1979-1980) ont montré que les dépôts d'un tel lac n'existent ni au sud, ni au nord-ouest du lac Tchad actuel. Pourtant, les vastes plaines alluviales du Chari (Tchad) et de la Komadougu (Niger) dont les pentes sont très faibles, auraient dû enregistrer une telle transgression (**Chouret** et al, 1977). La seule phase lacustre importante clairement identifiée sur la rive sud du lac Tchad est d'âge Ghazalien, 40000 à 20000 ans BP, (**Durand** et **Mathieu**, 1980). Pendant cette phase, les traces d'un grand lac du Plio-Pléistocène ont été retrouvées vers 22000 ans BP. L'extension maximale de ce grand paléo-lac Tchad a été estimée entre 2 et 3 fois la dimension du lac Tchad actuel (**Durand** et **Mathieu**, 1980 in **Durand** et **Lang**, 1986);

- de la permanence de la sédimentation deltaïque dans la zone étudiée. Elle permet difficilement d'envisager le stationnement d'un plan d'eau lacustre à la cote 320 m car, cette permanence du remblaiement fluvio-deltaïque aurait crée une zone de hauts fonds qui gène le passage des eaux (**Durand** et **Mathieu**, 1979-1980);

- de l'orientation des cordons selon des directions structurales connues du socle environnant.

Les observations que nous avons faites dans le Grand Yaéré nous conduisent aux remarques suivantes :

* les différentes positions du socle suivant la figure 4.8 (cf. chapitre 4) traduisent un jeu de failles en gradin . Des monts Mandara vers le lac Tchad, le socle s'enfonce progressivement. Ainsi, sur une distance d'environ 100 km, on passe d'une cote de 0 à -5 au niveau de Adya (Nord Maroua) à plus de -1000 à Ngodeni (en passant par des cotes de l'ordre de -100 en dessous du cordon). A ce titre, on peut dire que le cordon est situé dans le prolongement du fossé de NGODENI (cf. figure 1.11);

* le cordon sableux Limani-Yagoua présente des accidents structuraux. De direction générale SE-NW, il s'infléchit vers le SSE-NNW à partir de Kourdaya jusqu'à Guingley (**Ngounou Ngatcha**, 1990). Le point d'inflexion est situé au niveau du massif de Balda. Cette flexure est mise en parallèle avec certaines fractures de ce massif;

* le mouvement de flexure de "Kourdaya-Guingley" serait à l'origine du plongement des couches en direction de Yagoua. En effet, sur le terrain, le cordon est peu net en allant vers Yagoua tandis qu' il est très visible entre Kourdaya et Limani. Ce plongement aurait engendré un seuil d'érosion qui a réduit l'épaisseur du cordon dans cette direction;

* l'érosion aurait provoqué également le démantèlement des sédiments dans la plaine des Yaérés et permis la création des dépressions des lacs de Fianga-Tiken-Toubouris dans la région de Kalfou-Yagoua ainsi que la dépression des Yaérés entre le cordon et Kousséri;

* le cordon sableux Limani-Yagoua s'appuie sur deux inselbergs : le massif de Balda et le pointement rocheux de Dioudé. Contrairement aux autres massifs ultimes qui ne présentent aucune trace de tectonique, le massif de Balda est constitué de granite orienté. La linéation est très marquée

macroscopiquement. Ce massif présente également un chimisme particulier et une morphologie non annulaire qui font penser qu'il a subi un cycle tectonique plus récent que celui qui a provoqué sa mise en place au Cénozoïque.

Ce mouvement dont la dynamique se poursuit au Quaternaire, aurait favorisé la reprise de l'érosion pendant les périodes humides. La mise en relief des sables sur l'axe Limani-Yagoua et leur dépouillement total dans la plaine sédimentaire des Yaérés serait une des conséquences de cette érosion. Cette absence des sables du cordon dans ce secteur lui confère un rôle hydrogéologique limité.

A la suite de ces observations, des intérrogations se dégagent :

- le fait que le cordon sableux Limani-Yagoua longe une zone d'accident parallèle au fossé de NGODENI est-il une coïncidence de direction, conforme aux vents dominants d'un épisode aride de l'holocène, ou s'agit-il d'un contrôle tectonique?

Au Niger, **Pouclet** et **Durand** (1983) affirment que le "cordon de Tal", prolongement du cordon Limani-Yagoua, correspond exactement par sa localisation à la remontée du socle qui a affecté le fossé de Termit-Agadem au sud-est, au bord du lac Tchad. Ces auteurs ajoutent que la granulométrie et les sondages électriques réalisés par **Louis** en 1970, montrent dans le prolongement exact de la structure observée au sol, l'existence au Nord d'une faille normale, affectant le Crétacé-Cénozoïque et d'un rejeu de 2500 m. Ceci est pour eux la preuve d'un phénomène néotectonique, postérieur à 20000 ans BP au plus et d'un rejeu d'une dizaine de mètres au moins.

Au Mali, **Klein** (1979 in **Sauvage J. F.** et **Sauvage M.**, 1992) pense que les cordons ENE-WSW qui recouvrent le socle de Goundam et qui se prolongent dans le Tilemsi de Lerneb à l'Ouest se greffent sur des reliefs de faille. **Sauvage J. F.**

et **Sauvage M.**, (1992) pensent que la présense de tels reliefs n'est pas obligatoire bien que dans la région de Taoudenni, au Nord, les dunes s'accrochent sur des filons de dolérite en relief. Ces auteurs soulignent cependant que, le tracé des accidents longés par une zone de broyage est un drain d'humidité le long duquel une végétation plus dense se développe, apte à fixer des dépôts éoliens.

- comment situer dans le temps, l'une ou l'autre des hypothèses : rivages d'un grand lac holocène ou trace d'accidents récents?

Cette question démontre que le problème des cordons doit être complétée par des études de terrain et de laboratoire. Malheureusement, de telles recherches, auxquelles devraient collaborer, géologues, hydrogéologues, pédologues, géophysiciens et tectoniciens, trouvent difficilement leur financement.

7.2.3. Rôle hydraulique du cordon sableux.

De nombreux auteurs ont présenté le cordon sableux Limani-Yagoua comme une formation stérile. Le caractère stérile du cordon nous a amené (**Ngounou Ngatcha**, 1990) à admettre que la recherche de l'eau dans ce bourrelet revient à étudier les formations sous-jacentes afin de se rendre compte de ce que devient effectivement l'eau superficielle qui stagne en amont et en aval du cordon.

Des études plus récentes ont montré que le cordon est une formation à texture particulièrement sableuse (80 à 90 % de sables) avec une dominance de sables fins. En raison de cette texture, le cordon peut présenter une bonne infiltrabilité.

L'étude de la structure du cordon nous a montré qu'aucun niveau imperméable ne sépare la série de sable fin du cordon proprement dit, de la série de sable grossier inférieure.

Faute de mur imperméable, le cordon ne montre pas la configuration, d'une nappe au sens strict.

La porosité totale moyenne des sables du cordon est de l'ordre de 46 % en volume, la capacité de rétention de l'eau occupe seulement 4 % du volume soit 40 mm/an (**Brabant** et **Gavaud**, 1985). Cette faible capacité de retention ou porosité utile (specific yield) s'accompagne d'importants transferts d'eau par drainage dans les niveaux profonds. La vidange du cordon est ainsi accélérée sous l'influence de leur inclinaison vers l'aval.

Tableau 7.1. Caractéristiques hydrauliques de quelques forages situés sur le cordon sableux.

Localité	Profondeur (m)	Altitude (m)	Niveau piézométrique (m)	Epaisseur cordon (m)	Débit (m3/h)	Débit spécifique (m3/h/m)	T (10-4) (m2/s)
Double Alagarno	48.5	326	308.9	22	6.0	1.46	0.11
Kossa	57.8	326	309.7	23	2.0	0.29	2.00
Kilissawo	31.0	328	312.7	22	3.2	1.90	1.80
Khongo	51.0	320	299.2	?	3.2	0.50	?
Fadaré	41.0	323	308.9	?	3.0	1.28	2.60
Kourdaya	64.8	323	296.5	23	1.4	0.15	?

Nous avons recensé quelques forages implantés au droit du cordon. L'examen des caractéristiques hydrodynamiques (tableau 7.1) montre que les niveaux d'eau peuvent être rencontrés dans les sables fins du cordon ou dans les sables grossiers sous jacents (Cf. figure 7.1). Cela signifie que les variations du stock d'eau affectent autant les couches superficielles que les couches profondes. Les forages présentent des débits intéressants (3 à 6 m^3/h). Les transmissivités sont bonnes par rapport à celles des autres ouvrages (10^{-4} à 10^{-5} m^2/s).

Le fait que les transmissivités trouvées en amont et en aval du cordon soient de même ordre de grandeur permet de

considérer le niveau aquifère de part et d'autre comme relativement homogène. Ainsi, l'écoulement d'amont en aval se traduit par un passage normal qui ne dépend que de la charge hydraulique. Cette continuité latérale est également confirmée par la configuration de la piézométrie qui présente en amont et en aval du cordon, des gradients hydrauliques de même ordre.

Compte tenu de ces observations, le cordon ne représente pas une barrière hydraulique comme le pense certains chercheurs. **La teneur en tritium 4,1 UT mesurée à Kourdaya et les concentrations en nitrates rencontrées dans les ouvrages de captage de Kourdaya (27,28 mg/l), Kossa (166,30 mg/l) et Magdeme (176,90 mg/l), dues à une pollution anthropique, traduisent également la bonne perméabilité des sables du Cordon.**

En effet, sa grande perméabilité va favoriser la percolation d'une partie des eaux de ruissellement et des eaux de pluie vers la base. Ainsi, les sables grossiers vont contrôler la recharge et la décharge vers les niveaux d'altérite ou d'argiles sous jacents. Les sables grossiers constituent donc une couche réservoir régulatrice des réserves mobilisables des sables du cordon.

7.2.4. Conclusion.

L'approche de l'origine du cordon sableux Limani-Yagoua par l'interprétation des "linéaments" repérés sur photos aeriennes **et par les observations faites** à partir des coupes géologiques **méritent encore un important travail de recherches** dans le but d'accroître leur fiabilité.

Le cordon sableux ne constitue pas une nappe exploitable stricto sensu. Il a cependant, un rôle hydrogéologique important : c'est le premier réservoir interceptant les eaux d'infiltration générées par les pluies et le ruissellement.

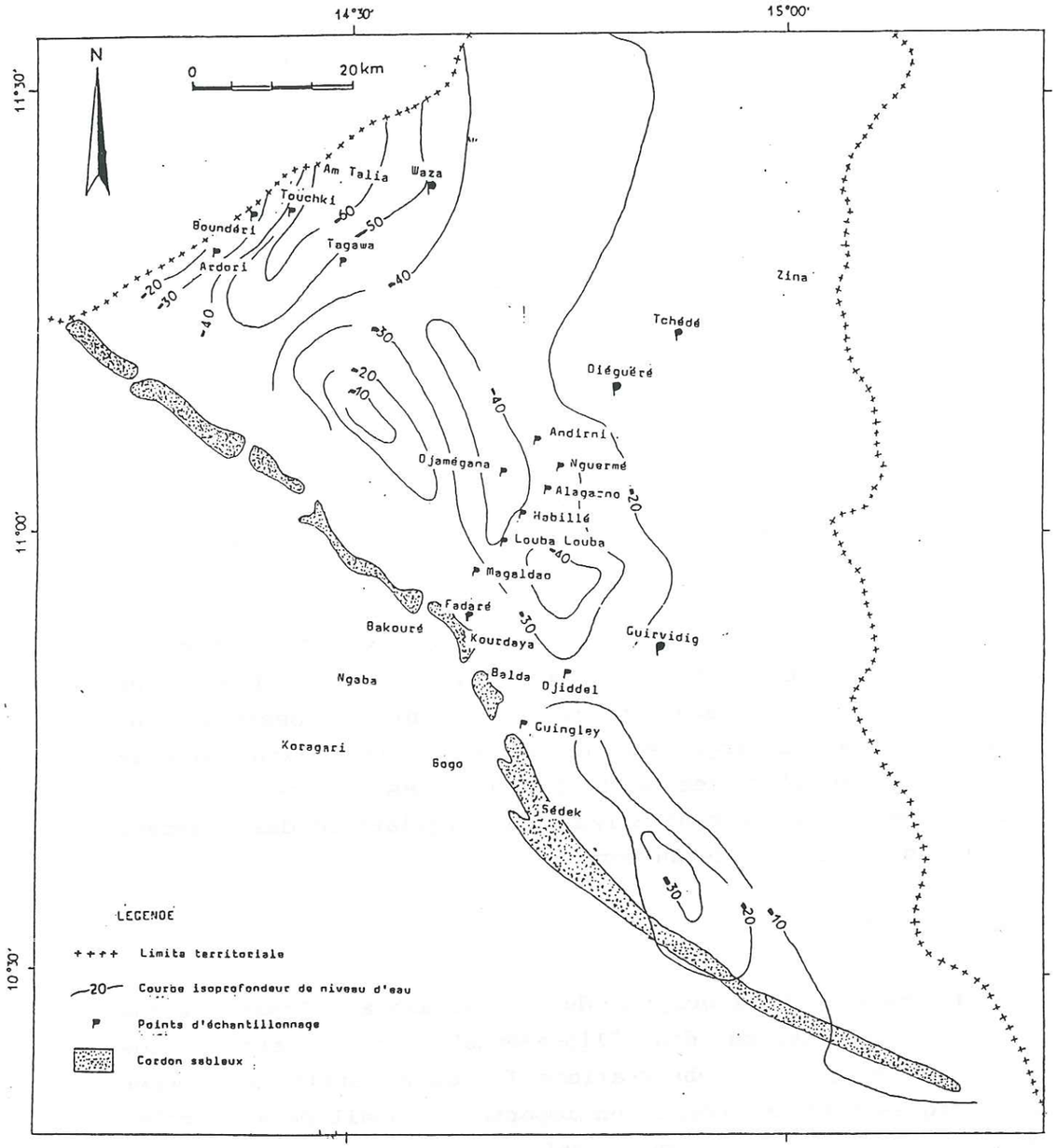


Figure 7.3. - Carte de situation des anomalies piézométriques et de localisation des points de prélèvement.

Les volumes d'eau qui échappent à l'évaporation sont ensuite transférés dans les niveaux aquifères sous-jacents.

La bonne perméabilité des sables du cordon est un aspect qui doit être prise en considération pour toute tentative de schématisation du fonctionnement hydraulique des systèmes aquifères du Quaternaire : **il nous semble necessaire d'envisager l'étude du transfert de l'eau à travers cette formation.**

7.3. Problème des anomalies piézométriques.

7.3.1. Généralités.

Entre 1967 et 1969, les points d'eau réalisés dans le cadre des travaux de cartographie des nappes du Nord Cameroun par le B.R.G.M. ont fait l'objet de mesures périodiques de niveaux statiques. Ces mesures ont permis à **Biscaldi** (1970) et **Tillement** (1970) de dresser la carte piézométrique de la nappe du Logone-Chari-Tchad. Cette carte a été publiée par la Direction des mines et de la géologie du Cameroun en 1970 sous le nom de "carte hydrogéologique Maroua-Fort Foureau" à l'échelle 1/500000e. A l'appui des données des campagnes d'hydraulique villageoise menées en 1984/85, cette carte a été reprise par le bureau d'étude **ARLAB** en 1985.

Toutes ces cartes, mettent en évidence en aval du cordon sableux Limani-Yagoua, des zones déprimées de la surface piézométrique des nappes, interprétée comme des dépressions fermées ou "nappes en creux" dont les cotes sont de -60 mètres dans l'axe Tagawa-Am Talia, -40 mètres entre Louba-Louba et Andirni, et -30 mètres environ au voisinage de Yagoua (figure 7.3). Une des principales questions qui se dégagent de l'analyse de cette figure est celle relative à l'origine de ces dépressions fermées.

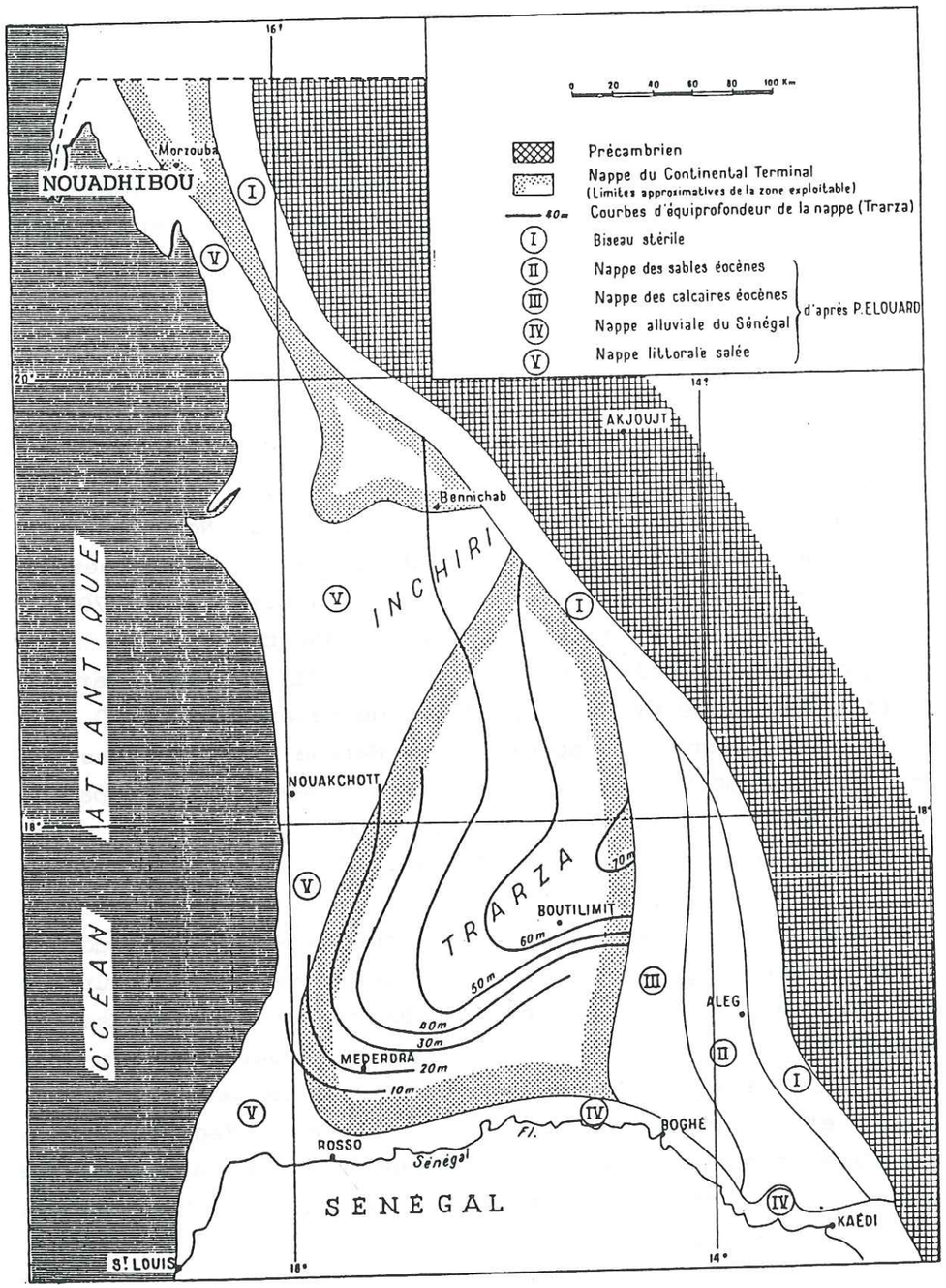


Figure 7.4. - Nappe du Trarza
(d'après **Elouard P.**in **Archambault**, 1987 complété).

7.3.2. Travaux antérieurs.

L'origine de telles dépressions a été abordée par divers auteurs dans les cas rencontrés en Afrique subsahélienne (Sénégal, Mauritanie, Mali, Niger et Tchad).

Pour le cas des "nappes en creux" du bassin littoral sénégalo-mauritanien; la nappe du Continental terminal du Ferlo et la nappe du Trarza (figure 7.4), **Dieng** (1987) a pu expliquer le phénomène par une liaison entre les variations du niveau marin et du climat intervenues pendant les dernières périodes du Quaternaire, dernière regression marine à 18000 ans BP.

Dans le cas des nappes déprimées des bassins intérieurs; la nappe du Gondo au Mali (figure 7.5) et la nappe du delta intérieur du Niger, l'hypothèse d'une reprise par évaporation a été mise en première ligne. La minéralisation relativement forte des eaux de ces zones a été un argument utilisé pour renforcer cette hypothèse dont la confirmation a été tentée à l'aide des isotopes du milieu (**Aranyossy** et al, 1989), ainsi qu'à l'aide des modèles mathématiques (**Albergel**, 1978 in **Dieng**, 1987; **Ndiaye** et al, 1990; **Ndiaye** et al (en préparation).

L'interprétation des dépressions piézométriques des bassins de l'intérieur de l'Afrique Sahélienne qui, à première vue, ne pouvait s'expliquer que par l'évaporation, fournit en définitive des indications fort intéressantes sur les limites de cette hypothèse. Ainsi, à partir des cas de nappes du lac Tchad, du delta du Niger, mais surtout de l'Azouad (au Mali), on peut avancer que l'évaporation ne pourrait se manifester à une profondeur dépassant 40 à 50 m dans les terrains très peu perméables (**Dieng**, 1987). Plusieurs hypothèses ont été avancées sur l'origine des dépressions piézométriques du Grand Yaéré.

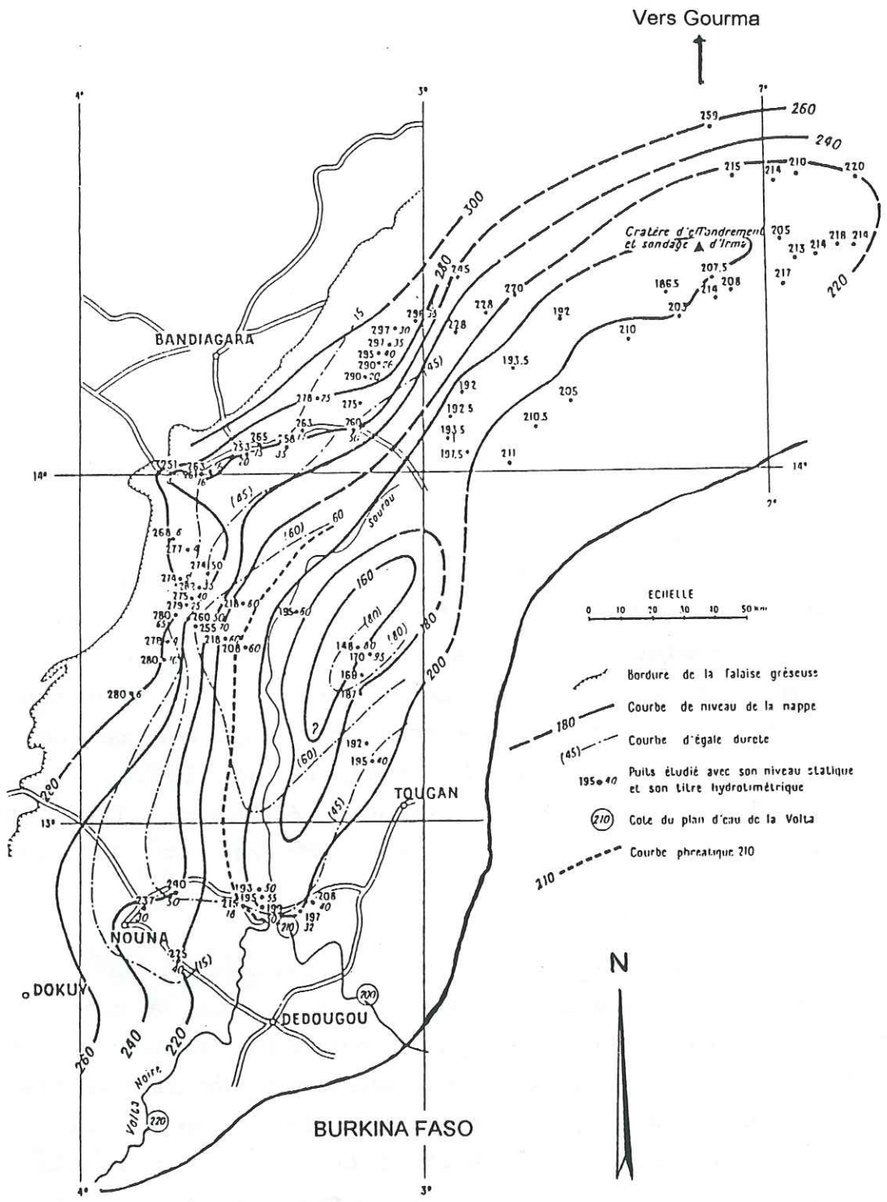


Figure 7.5. - Nappe du Gondo au Mali
(d'après **Palausi G** et **Defossez M.**, in **Archambault**, 1987 complété).

Devant le nombre de faits observés en Afrique de l'Ouest et en Afrique du Nord, de nombreux auteurs, pour expliquer les dépressions piézométriques fermées du Grand Yaéré, ont exploité l'hypothèse d'**Archambault** (1960 et 1987) selon laquelle les conditions qui semblent avoir permis la création, et le maintien, de telles anomalies sont pour l'essentiel les suivantes :

- la température annuelle moyenne très élevée (elle atteint 30 °C);

- la siccité extrême de l'atmosphère (intensité de l'évaporation, 3 m sur eau libre);

- l'origine continentale; les terrains contenant la nappe sont pour la plupart des sables plus ou moins argileux, ni perméables, ni très perméables (K Darcy de l'ordre de 10^{-5} m/s?);

- l'influence possible des termites (Au plus gros de la saison sèche, quand il n'y a plus d'eau nulle part et quand la nappe phréatique se situe à grande profondeur, il y a toujours, quelque part, une réserve d'eau ou de la terre humide nécessaire à ces insectes, à leur activité incessante ... D'où vient cette eau?), et des vers (Il semblerait selon UNESCO, nature et ressources, vol. XX, n° 4, qu'ils puissent digerer chaque jour, 30 fois leur volume de terre, soit 1200 t (Côte d'Ivoire) de terre déplacée par hectare et par an), plus encore peut-être, d'arbres ou arbustes dont les racines s'enfoncent à plusieurs dizaines de mètres de profondeur (selon **Archambault**, un sondeur a certifié avoir recoupé au Sénégal, dans le Continental terminal, une racine à 40 m de profondeur).

Pour soutenir cette hypothèse, **Biscaldi** (1970) fait remarquer que les dépressions fermées de Tagawa-Am Talia se trouvent d'une part sous des zones non soumises à l'inondation (l'évapotranspiration s'exerce sur les eaux souterraines) et

Tableau 7.2. - Données isotopiques dans la zone dite déprimée du Grand Yaéré.

Code	Localité	X	Y	Z	date	type	Cond.	O-18	H-2	H-3
CAM 59	Alagarno	467,8	1217,6	307	30/03/91	P	692	-4,43	-31,7	1,0
CAM 43	Alagarno	467,8	1217,6	307	31/10/89	P	834	-4,59	-29,0	1,0
CAM 61	Andirni	467,0	1223,0	309	30/03/91	P	606	-4,87	-33,6	0,6
CAM 60	Andirni	467,0	1223,0	309	30/03/91	F	672	-5,11	-36,4	0,3
CAM 39	Andirni	467,0	1223,0	309	30/10/89	P	674	-4,91	-33,9	0,2
CAM 89	* Ardori	431,0	1252,6	310	25/06/90	P	708	-4,48	-30,6	13,7
CAM 47	* Ardori	431,0	1252,6	310	01/11/89	P	1050	-4,63	-30,3	12,6
CAM 88	* Bounderi	345,6	1254,4	306	25/06/90	P	1135	-4,35	-33,1	0,8
CAM 100	* Dieguéré	475,4	1231,0	307	03/10/90	P	330	0,77	-3,6	
CAM 62	* Diguéré	475,4	1231,0	307	22/06/90	P	346	0,13	-3,6	36,3
CAM 150	* Diguéré	475,4	1331,0	309	27/03/91	P	310	0,37	-4,0	
CAM 102	Djemegana	467,0	1220,0	309	05/10/90	F	250	-4,84	-37,1	
CAM 67	Djiddel	472,2	1995,5	321	30/03/91	P	668	-4,29	-28,1	8,7
CAM 145	Djiddel	472,2	1195,5	321	27/03/91	F	290	-4,02	-27,3	
CAM 119	Djiddel	472,2	1195,5	321	05/10/90	F	530	-4,09	-26,0	4,6
CAM 66	Guingley	464,0	1191,7	326	30/03/91	F	476	-4,73	-29,2	0,2
CAM 116	Guingley	464,0	1191,7	326	05/10/90	F	480	-4,19	-29,4	0,3
CAM 117	Guingley	464,0	1191,7	326	05/10/90	F		-4,85	-32,9	
CAM 68	* Guirvidig	482,4	1202,6	314	01/11/89	P	507	-2,94	-19,4	6,1
CAM 120	* Guirvidig	482,4	1202,6	314	05/10/90	P	530	-1,79	-16,8	4,6
CAM 38	Habillé	464,8	1215,4	312	30/03/91	P	492	-4,93	-31,7	
CAM 58	Habillé	464,8	1215,4	312	30/10/89	P	487	-4,94	-32,7	0,5
CAM 37	Louba Louba	462,4	1210,8	318	30/10/89	P	602	-5,00	-33,0	2,6
CAM 57	Louba Louba	462,4	1210,8	318	30/03/91	P	462	-4,93	-31,1	2,6
CAM 36	Magaldao	460,0	1207,4	320	30/10/89	P	316	-5,35	-35,3	
CAM 56	Magaldao	460,0	1207,4	320	30/03/91	F	277	-5,29	-33,6	
CAM 151	Nguermé	468,5	1221,4	309	27/03/91	F	350	-4,64	-33,6	0,43
CAM 90	* Omaka	428,4	1251,6	311	01/11/89	P	1017	-2,80	-22,8	21,8
CAM 46	* Omaka	428,4	1251,8	311	25/06/90	P	1004	-3,53	-21,7	23,9
CAM 85	Tagawa	440,0	1251,6	306	25/06/90	P	151	-6,03	-45,2	0,6
CAM 45	Tagawa	440,0	1251,6	306	01/11/89	P	1088	-6,06	-46,3	0,8
CAM 125	Tagawa	440,0	1251,6	306	07/10/90	P	1150	-4,91	-42,0	
CAM 101	* Tchédé	482,8	1236,8	305	03/10/90	P	620	-0,21	-7,2	
CAM 63	* Tchédé	482,8	1236,8	305	22/06/90	P	693	-0,51	-7,4	35,5
CAM 149	* Tchédé	482,8	1236,8	305	27/03/91	P	647	-0,26	-6,5	
CAM 87	Touchki	437,4	1255,4	305	01/11/89	P	531	-5,12	-38,4	0,5
CAM 49	Touchki	437,4	1255,4	305	25/06/90	P	582	-5,17	-39,6	0,4
CAM 167	* Vingueleri	430,0	1246,5	311	30/03/91	P	854	-3,68	-25,2	
CAM 130	* Vingueleri	430,0	1246,5	311	10/07/90	P	700	-2,81	-21,4	
CAM 86	* Waza	453,4	1260,0	311	25/06/90	P	228	-3,77	-22,9	28,5
CAM 44	* Waza	453,4	1260,0	311	01/11/89	P	394	-3,73	-23,0	30,3
CAM 10	* Waza	453,4	1260,0	311	avril 87	P	110	-3,79	-23,4	
CAM 123	* Waza	453,4	1260,0	311	07/10/90	P	200	-2,89	-20,1	
CAM 147	* Zina	493,5	1152,5	304	27/03/91	P	591	-2,91	-19,1	48,86

correspondent d'autre part au passage de la nappe dans les argiles inférieures (rôle de la lithologie).

En 1990, nous avons fait une analyse critique de détail de cette hypothèse et sans toutefois la rejeter, nos observations nous ont permis de considérer ces dépressions comme la conséquence :

- d'une absence de continuité lithologique au passage de la plaine de piémont à la plaine des Yaérés;

- des variations lithologiques de niveaux aquifères dans la nappe des alluvions du Logone-Chari;

- de la structure tectonique comme en témoigne l'enfoncement du socle.

Compte tenu de la complexité des hypothèses et du souci de comprendre le mécanisme de circulation des eaux entre la plaine du piémont et celle des Yaérés, l'étude des dépressions méritait d'être approfondie de façon à faire coller étroitement les hypothèses au cas réel.

7.3.3. Etudes isotopiques.

7.3.3.1. Echantillonnage.

Dans le cadre de cette étude, 24 points d'eau dont 8 forages et 16 puits ont été sélectionnés en bordure et dans le centre des dépressions comme l'indique la figure 7.3. Des campagnes de prélèvements échelonnées de septembre/octobre 1989 à mars 1991 ont permis d'obtenir 44 couples de mesures en isotopes lourds (oxygène-18 et deutérium) et 29 mesures de tritium (tableau 7.2).

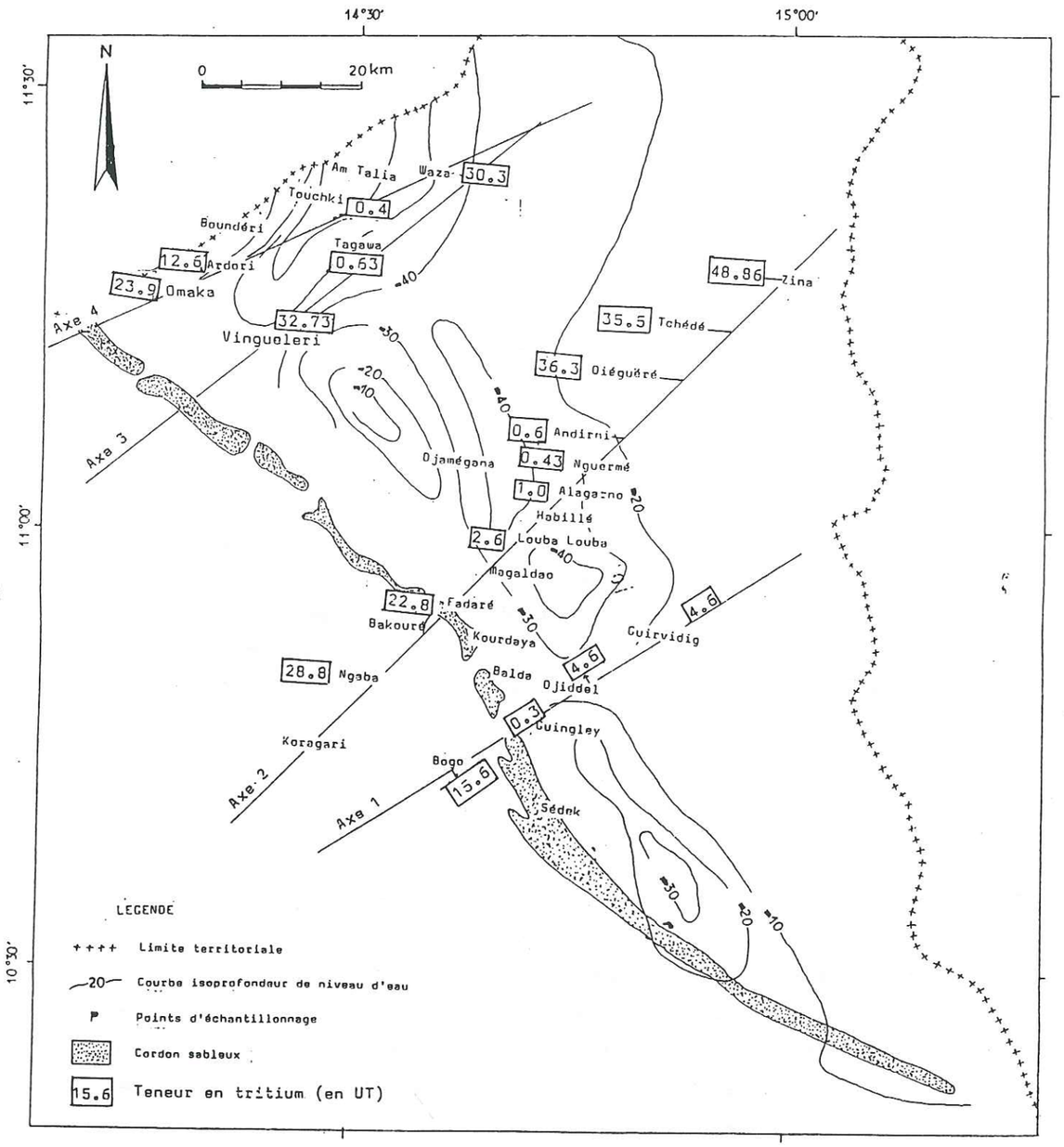


Figure 7.6. - Carte montrant la distribution géographique des teneurs en tritium des eaux souterraines "indifférentiées" suivant plusieurs axes dans la zone dite déprimée.

7.3.3.2. Etude par le tritium.

La distribution géographique des teneurs en tritium fait apparaître une évolution particulière : on observe une fréquence plus grande des échantillons ayant des teneurs en tritium faibles dans l'axe des dépressions tandis qu'en bordure on a des teneurs plus élevées (figure 7.6).

La présence dans les localités de Bogo (axe 1), Ngaba, Fadaré, Zina, Tchédé, Diéguéré (axe 2), Vingueleri, Waza (axe 3), Omaka, Ardori (axe 4), de teneurs significatives en tritium (> 10 UT) impliquerait l'existence d'une circulation locale plus rapide grâce à une bonne perméabilité des dépôts sédimentaires.

Les très faibles valeurs en tritium sont mesurées à Guingley, Djiddel, Guirvidig (axe 1), Louba Louba, Alagarno, Nguermé, Andirni (axe 2), Tagawa (axe 3) et Touchki (axe 4) où des variations latérales de faciès sont importantes dans le sens d'un enrichissement en argiles; perméabilité réduite et circulation très lente, traduisent comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent, la présence d'eaux anciennes ou d'un mélange, en proportions variables d'eaux anciennes et d'eaux actuelles.

En somme, nous observons comme il a été souligné dans le chapitre 6, une stratification des eaux en deux familles, non liée à un déplacement par "effet piston" des épisodes successifs de recharge au sein d'un même ensemble hydraulique, mais à des niveaux aquifères différents : en surface, des eaux récentes (^3H > 4 UT) et en profondeur, des eaux anciennes (^3H < 4 UT). Cette zonalité verticale est confortée par les isotopes lourds.

7.3.3.3. Etude par l'oxygène-18 et le deutérium.

Les résultats analytiques ont été traités d'une part en fonction de la conception ancienne (aquifères indifférenciés), et d'autre part en liaison avec le schéma de répartition des systèmes aquifères auquel nous sommes parvenus.

i) - Conception ancienne.

L'analyse de la relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines "indifférenciées" conduit à la droite :

$$\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H = 5,96*\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O - 4,44 \quad r^2 = 0,93 \qquad (7.1)$$

Elle a une pente de l'ordre de 6, située en dessous de celle des eaux météoriques. Cette droite est marquée par l'influence des points d'eau de bordure qui présentent un faciès d'eaux évaporées (figure 7.7).

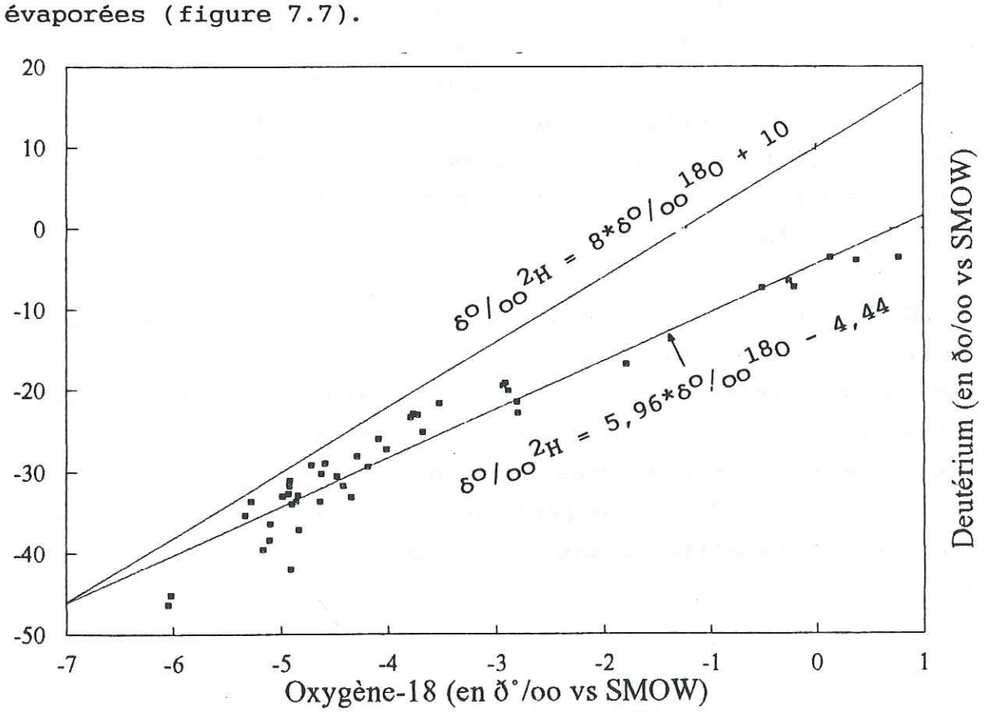


Figure 7.7. Relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines "indifférentiées" dans la zone dite déprimée.

Si l'on ne s'en tient qu'à cette droite, sa nature fait admettre que l'évaporation peut affecter des niveaux d'eau profonds et que ce processus replacé dans l'échelle des temps des variations climatiques, pourrait expliquer la formation progressive des dépressions du Grand Yaéré jusqu'à leur état actuel.

Or, il n'en est rien car, la large gamme de variation des teneurs en oxygène-18 ($-6 < \delta^{o}/_{oo}{}^{18}O < 1$) comme nous venons de l'observer également pour le tritium (cf. figure 7.6), démontre que les eaux doivent être d'origines différentes.

ii) Conception actuelle.

L'analyse des relations oxygène-18/deutérium des eaux souterraines en fonction des niveaux aquifères a permis d'obtenir deux droites de régression linéaire :

$$\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H = 5,20*\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O - 5,60 \quad r^2 = 0,95 \qquad (7.2)$$

$$\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H = 7,75*\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O + 3,60 \quad r^2 = 0,71 \qquad (7.3)$$

Sur la figure 7.8, les points des eaux superficielles s'alignent sur une droite de pente inférieure à celle des eaux météoriques mondiales, ce qui indique un enrichissement par évaporation.

La droite (7.3) des eaux profondes, est sensiblement parallèle à la droite météorique mondiale (figure 7.9). Les trois points encadrés sur le graphique, qui se détachent du reste ont été obtenus à Tagawa, dans un puits non entretenu, probablement pollué, dans lequel nous n'avons pas pu, en raison du niveau statique (-53 m), réaliser un pompage préliminaire afin de placer le moment de prélèvement bien après l'effet de capacité du puits.

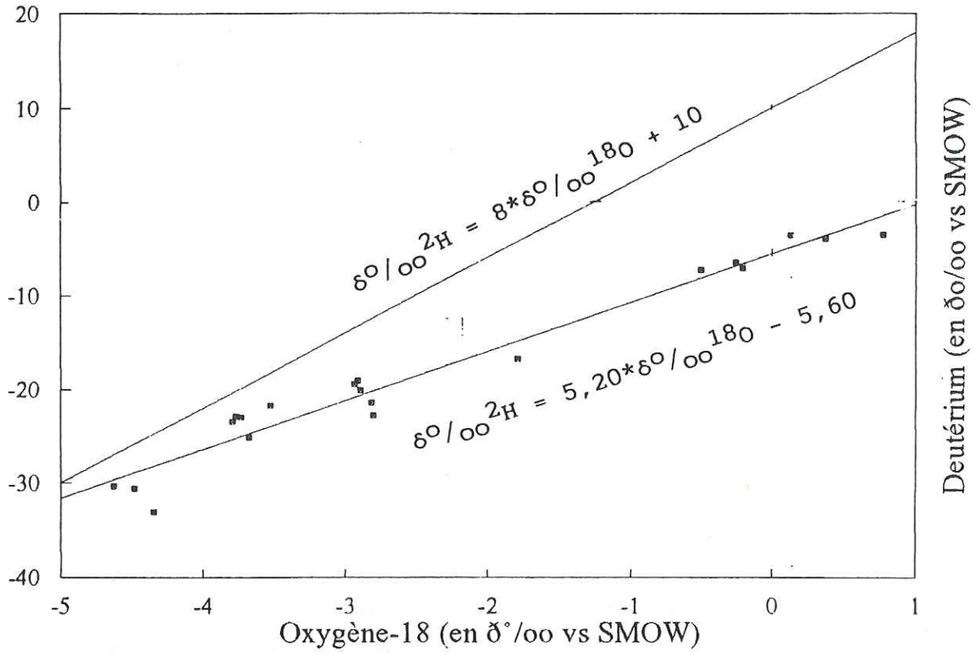


Figure 7.8. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines des niveaux aquifères superficiels dans la zone dite déprimée.

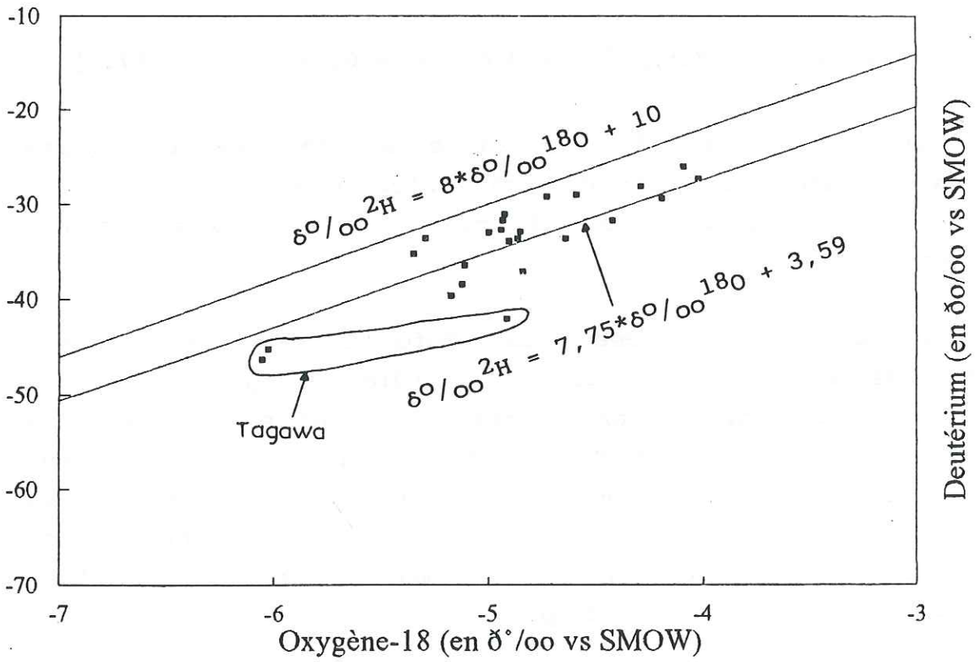


Figure 7.9. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines des niveaux aquifères profonds dans la zone dite déprimée.

Somme toute, **l'équation (7.3) montre que les niveaux aquifères profonds ne subissent pas l'influence de l'évaporation.** L'origine de leur recharge est à rechercher dans le système aquifère du Piémont (cf. chapitre 6). Le caractère peu évaporé des eaux des aquifères profonds est confirmé par la relation oxygène-18/niveaux statiques.

7.3.4. Les variations de niveaux d'eau.

7.3.4.1. Généralités.

Une synthèse des études faites par **SOGREAH** (1990) sur les forages en zone soudano-sahélienne montre un abaissement du niveau d'eau vers la saison sèche selon les variations présentées dans le tableau 7.3.

Tableau 7.3. Profondeur constatée du niveau statique sur des forages en zone soudano-sahélienne (d'après **SOGREAH**, 1990).

Niveau statique début novembre (en m)	Niveau statique fin juin (en m)	Abaissement du niveau (en m/mois)
0.0	8.0	1.0
5.0	11.0	0.75
10.0	14.0	0.50
15.0	17.5	0.30
20.0	21.5	0.20
25.0	26.0	0.10

D'après le tableau 7.3, on remarque que plus les profondeurs des niveaux statiques augmentent, moins les variations de niveau deviennent significatives, ce qui peut aussi signifier que plus la profondeur du niveau croît, plus l'effet de l'évapotranspiration décroît jusqu'à une certaine profondeur et la nappe tend à rester en équilibre.

Comme nous avons déjà eu à l'évoquer (**Ngounou Ngatcha**, 1990), des observations de l'**UNESCO** en 1967-1968 ainsi que celles de **Naah** (communication directe) entre 1984 et 1987 et, les nôtres entre 1989 et 1992 n'ont pas mis en évidence de variations significatives de niveaux statiques les plus bas dans quelques points d'eau situés dans la zone des dépressions (tableau 7.4).

Tableau 7.4. Niveaux statiques dans quelques puits situés dans la zone dite déprimée du Grand Yaéré.

Localité	Profondeur (en m)	Niveau statique (en m)	Date
Tagawa	90.0	53.22 53.00 55.70 ? 53.80	22/01/68 01/11/89 07/10/90 30/03/91
Touchki	63.5	33.00 42.80 34.20 42.75	01/11/89 25/06/90 07/10/90 30/03/90
Andirni	52.0	46.00 45.59 45.90	30/10/89 22/06/90 30/10/90
Alagarno	51.0	49.00 ? 38.60 37.83	31/10/89 22/06/90 30/10/90
Louba-Louba	44.0	39.00 39.00 37.80 39.00	30/10/89 22/10/90 30/10/90 27/03/91

De plus, les cartes piézométriques existantes ne font ressortir aucun abaissement de caractère permanent depuis 1967. On peut remarquer un niveau général très stable sur lequel viennent se greffer les fluctuations saisonnières qui ne sont très sensibles qu'en bordure des axes d'alimentation. Les sens d'écoulement que nous avons déduit des mesures en fin de saison des pluies et en fin de saison sèche dans certains

ouvrages (cf. tableau 7.4) restent totalement valables en toutes périodes de l'année, sauf peut être en cas de circonstances exceptionnelles induites par exemple par une sécheresse prolongée, ce qui n'est pas encore le cas.

7.3.4.2. Relation oxygène-18/niveaux statiques.

Dans les systèmes aquifères de la Haute Bénoué (Nigéria), la profondeur moyenne jusqu'à laquelle l'évaporation peut exercer son influence est de 8 à 10 mètres (**Nu**, 1987 in **Onugba**, 1990). Les études isotopiques faites au Mali (**Aranyossy** et al, 1989) indiquent que l'enrichissement isotopique est important jusqu'à 10-12 mètres de profondeur et qu'il peut affecter certains échantillons jusqu'à 18-20 mètres. En effet, le flux évaporatoire estimé à 500 mm/an à un mètre de la surface du sol, n'est que de quelques dixièmes de millimètres/an au delà de 20 mètres.

Nous avons étudié la variation de la composition isotopique (oxygène-18) des eaux souterraines de la zone déprimée du Grand Yaéré en rapport avec le niveau d'eau libre des nappes (figure 7.10). **Cette figure suggère que la reprise par évaporation modifie les teneurs en oxygène-18 des eaux des niveaux superficiels : nappes perchées non protégées par une couverture d'argile; Waza, Omaka et Vinguéléri. Elle n'affecte pratiquement pas les eaux des nappes perchées piégées dans les lentilles de sables fossiles sous recouvrement argileux (Ardori et Boundéri) ainsi que les nappes profondes (Louba-Louba, Habillé, Touchki, Andirni, Alagarno et Tagawa).**

Quelques uns des points d'eau ci-dessus, se singularisent par des eaux très minéralisées. Cette augmentation de la salinité pourrait jouer pour certains en faveur de l'hypothèse évaporatoire. L'absence de corrélation entre la conductivité et les teneurs en chlorures (figure 4.11) indique plutôt une pollution anthropique et/ou l'influence de la lithologie (le pourcentage élevé de faciès argileux et par conséquent une

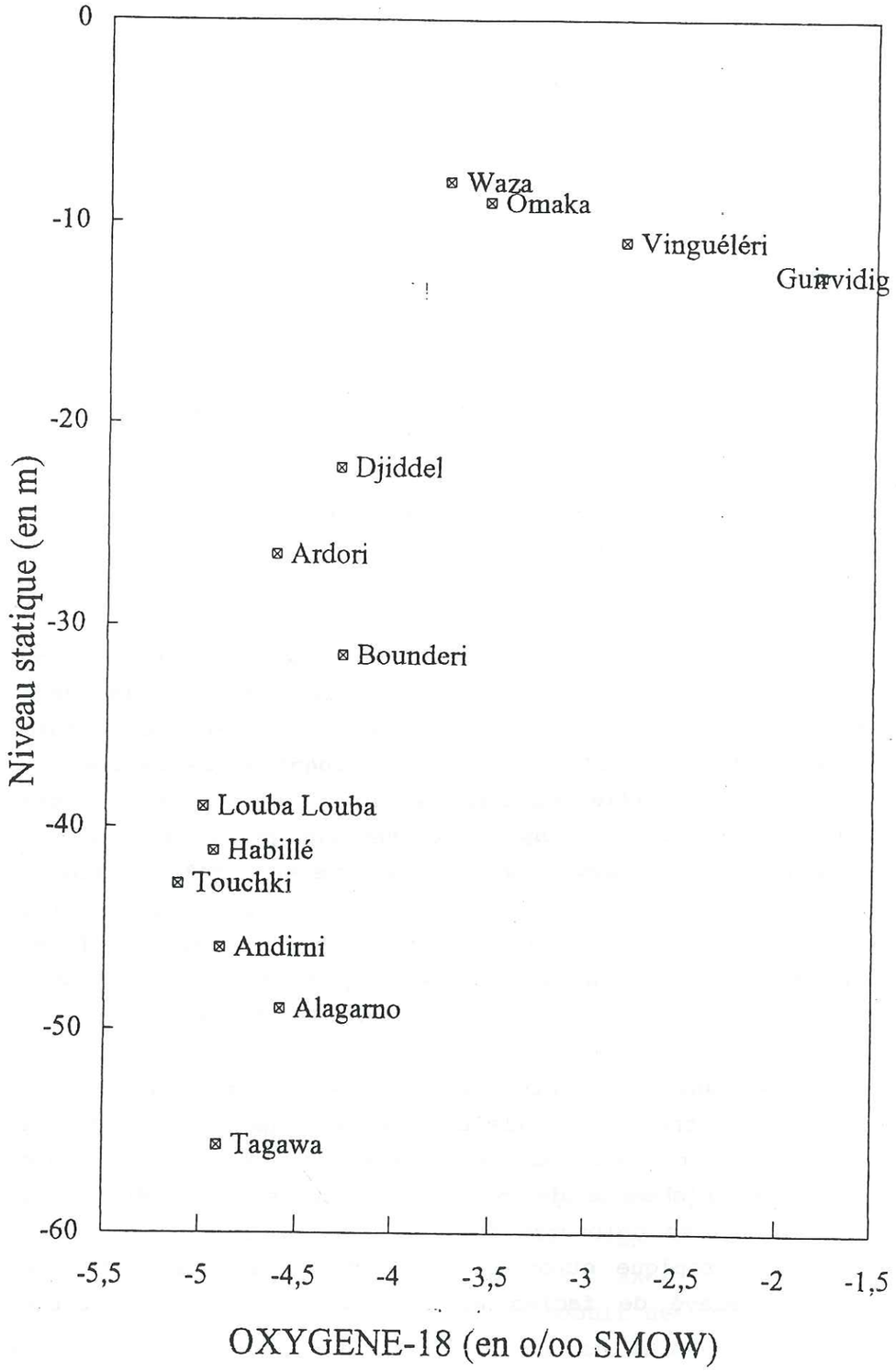


Figure 7.10. - Relation oxygène-18/niveau statique dans la zone dite déprimée.

faible perméabilité et une très lente circulation de l'eau impliquant des temps de résidence très longs).

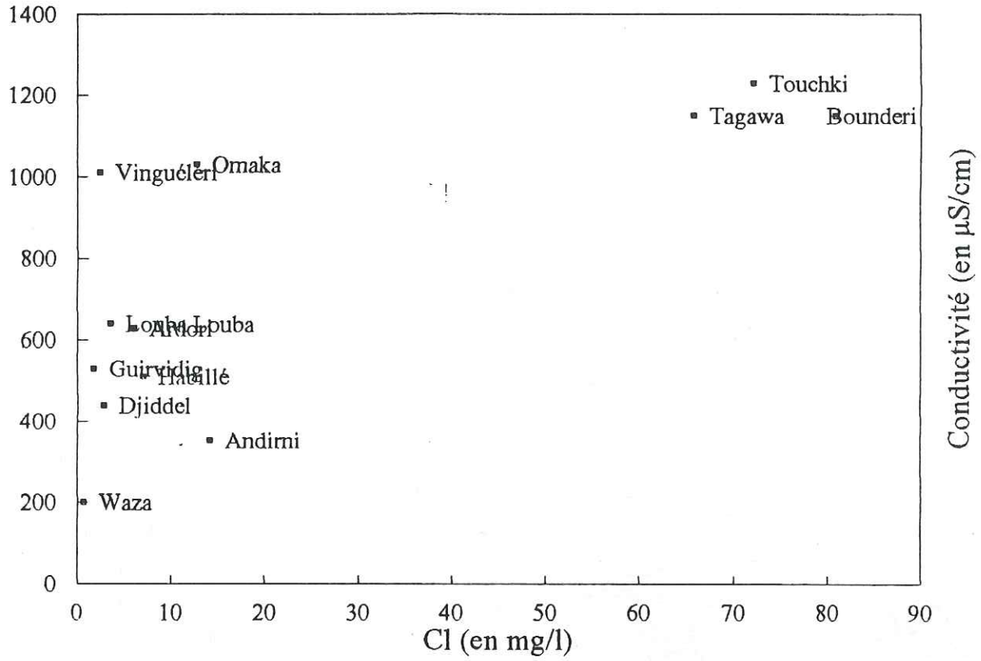


Figure 7.11. Relation conductivité/chlorure dans quelques points d'eau de la zone dite déprimée.

Dans la zone des dépressions du Grand Yaéré, d'un point de vue général, **les dépressions piézométriques qui pourraient se produire dans les niveaux aquifères superficiels doivent être traitées d'un point de vue différent de celles qui étaient jadis localisées dans les niveaux aquifères profonds.** La figure 3.4 (cf. chapitres 3) donne un aperçu des mécanismes hydrodynamiques de formation des dépressions dans les nappes superficielles du piémont et des Yaérés.

A la suite des conclusions sur la relation oxygène-18/deutérium, la corrélation entre l'oxygène-18 et les niveaux statiques, confortée par le diagramme chlorure/conductivité, confirme que les nappes profondes ne sont pas affectés par

Coupe 6. Voir axe de coupe sur la planche A en annexe 1.

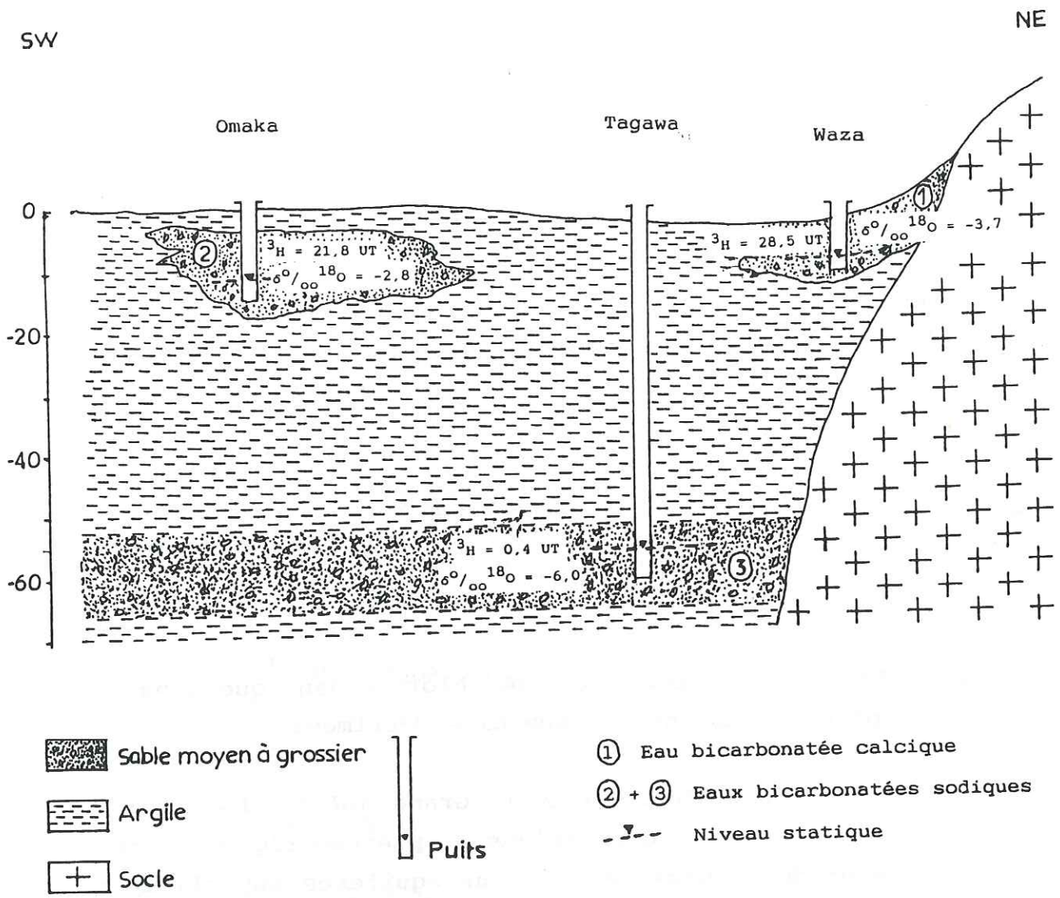


Figure 7.12. - Coupe schématique de localisation des niveaux aquifères, de distribution des faciès chimiques et des teneurs en isotopes dans la zone dite déprimée (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

l'évaporation. Les coupes géologiques et hydrogéologiques montrent que la construction des cartes piézométriques a été faite à partir des données de niveaux aquifères différents.

7.3.5. Origine géologique : hypothèses explicatives.

Dans les zones dites déprimées du Grand Yaéré, la surface piézométrique se situe entre -10 et -60 mètres de profondeur. L'utilisation des modèles numériques (**Dieng**, 1987; **Ndiaye** et al, 1990; **Ndiaye** et al (en préparation) montre qu'il faudrait environ 9000 ans, pour que l'évaporation puisse créer des dépressions piézométriques à 40 mètres de profondeur.

Cette analyse ou modèle, ne cadre pas avec le contexte géologique et hydrogéologique de notre région d'étude. En se référant aux figures 4.8 et 7.2, nous remarquons que :

* le secteur aval du cordon sableux Limani-Yagoua a été le siège de mouvements épirogéniques sensibles vers la fin du Mésozoïque début cénozoïque qui ont engendré le fossé de Ngodeni. Les traces de déformation que l'on retrouve sur le cordon sableux attestent que ces mouvements se poursuivent au Quaternaire. Ces mouvements ont engendré une zone synclinale bordée en amont et en aval par un système de failles issues de la structure en gradin du socle et, des variations de niveau des sédiments avec affaissement des terrains. L'aire d'extension du fossé de NGODENI est marquée au niveau de la surface du sol, entre Kousséri et Yagoua, par des dépressions géologiques occupées par des lacs (région de Kalfou-Yagoua) ou des mares (Yaéré stricto sensu).

* Il y a donc une coïncidence entre les zones de dépressions géologiques et les zones dites de dépressions piézométriques. Les apports lacustres liés à l'affaissement des terrains, ont été suivis probablement de venues fluviatiles, ce qui s'est traduit dans le secteur par la superposition de deux niveaux aquifères distincts.

Entre Waza et Omaka en passant par Tagawa, on passe d'un niveau statique de l'ordre de -10 m à Waza et Omaka à un niveau statique de -53 m à Tagawa. Les distances qui séparent Tagawa de Waza et Omaka étant respectivement de 2 km et 4 km environ (figure 7.12). Ce cas de figure est identique à ce que l'on obtiendrait entre Tchédé (niveau statique, -7 m) et Andirni (niveau statique, -45 m) ou Alagarno (niveau statique, -38 m). Dans ce contexte, **nous ne sommes pas vraiment en présence de depréssion** car, les charges hydrauliques sont celles de deux niveaux aquifères différents. On comprend donc, comme la chimie et la composition isotopique des eaux nous le confirment, que **la construction des cartes piézométriques à été faussée en adoptant indifféremment les niveaux statiques d'un aquifère de type bicouche.**

7.3.6. Conclusion.

L'analyse des relations oxygène-18/deutérium et oxygène-18/niveaux statiques des points d'eau situés dans les zones dites déprimées a montré que **l'évaporation n'a aucune influence sur les niveaux aquifères profonds.**

Dans la plaine des Yaérés, il faudrait désormais distinguer dans les terrains du Quaternaire, deux niveaux aquifères et non une seule couche géologique indifférenciée. Cette différenciation est confortée par les coupes géologiques, la distribution des faciès chimiques et des teneurs en isotopes des eaux souterraines.

L'hypothèse de l'existence des dépressions piézométriques dans les niveaux aquifères des Yaérés, qu'on tentait d'expliquer par l'évaporation, doit être abandonnée.

Chapitre 8. EVALUATION DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES.

8.1. Ressources en eaux souterraines du périmètre étudié.
8.2. Synthèse des connaissances hydrodynamiques par des méthodes de simulations numériques.
8.3. Conclusion.

8.1. Ressources en eaux souterraines du périmètre étudié.

8.1.1. Généralités.

En nous référant aux résultats obtenus dans les chapitres 3 et 4, nous avons évalué les ressources et les réserves en eaux souterraines dans le périmètre étudié.

Les diverses définitions, techniques ou méthodes concernant l'évaluation des ressources en eaux souterraines sont inspirées de **Plotnikov** (1962), **Castany** (1979), entre autres.

L'expression "ressources en eaux souterraines" englobe quatre notions. Les ressources régulatrices, les réserves permanentes et les ressources exploitables (figure 8.1). Les réserves permanentes donnent une idée de la grandeur du volume d'eau constant dans l'horizon et les ressources régulatrices sont un élément très important du bilan des eaux souterraines.

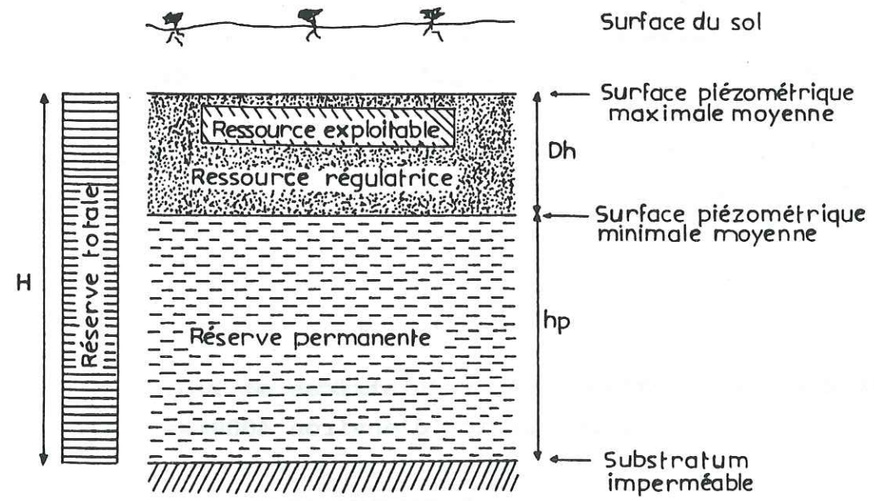


Figure 8.1. Réserves et ressources des aquifères à nappe libre (**H** , **hp** et **Dh** sont définis dans le texte).

Afin de clarifier la notion de ressource en eaux souterraines, avec comme objectif la gestion de l'eau, il est nécessaire d'après **Castany** (1979), d'énoncer les concepts de réserve et de ressource. Le concept de réserve est associé à celui de ressources non renouvelables, relatif au volume d'eau disponible (eau gravitaire), emmagasiné à un instant donné ou au cours d'une durée annuelle moyenne dans le système considéré. Le concept de ressource représente le volume d'eau pouvant être extrait d'un système compte-tenu de contraintes imposées pendant une durée définie.

Les réserves sont généralement exprimées en l'hm^3 (10^6 m^3) et le Km^3 (10^9 m^3) ou le module en m^3/Km^2 et les ressources en m^3/s, l'hm^3/an, le Km^3/an ou les modules $l/s.Km^2$, $m^3/an.Km^2$.

8.1.2. Ressources régulatrices en eaux souterraines.

C'est le volume d'eau compris dans la zone des fluctuations de la surface des nappes d'eau souterraines libres. Ce volume règle le débit des eaux souterraines. Il varie en fonction des fluctuations saisonnières et interannuelles. Dans la pratique, seuls les aquifères à nappe libre présentent une fonction régulatrice utilisable.

La détermination des ressources régulatrices à partir de la fluctuation de la surface libre des nappes peut être faite d'après la formule :

$$Vr = A*Dh*n_e \qquad (8.1)$$

Vr désigne les ressources régulatrices et **A** la superficie du périmètre étudié. Elle est ici d'environ 4000 Km^2 soit 4.10^9 m^2;

Dh représente la variation moyenne du plan d'eau de la nappe dans le périmètre considéré (cf. figure 8.1). Les fluctuations les plus élevées, de l'ordre de 2,5 m sont rencontrées dans les niveaux superficiels proches des axes de

recharge. Par contre, les fluctuations sont faibles (0,5 à 1 m) dans les niveaux profonds. Dans les calculs nous considérons une fluctuation moyenne annuelle de l'ordre de 1,5 m;

n_e désigne la porosité efficace. Elle a été adoptée en relation avec les travaux de **Lefèvre** (1971) et de **SOGREAH** (1978). Elle est de 8 % pour les sables fins à moyens et de 5 % pour les altérites et les argiles sableuses, ce qui représente une valeur moyenne de 6 %.

$$\underline{Vr = 0,36*10^9\ m^3/an}.$$

8.1.3. Réserves permanentes.

C'est le volume d'eau des nappes d'eau souterraines avec surface libre au-dessous de la zone des fluctuations de cette surface, ainsi que tout le volume d'eau dans les nappes d'eau souterraines captives. Ce volume d'eau varie seulement dans un intervalle de temps géologiques.

Le calcul des réserves permanentes peut être éffectué à partir de la relation :

$$Vp = A*hp*n_e \text{ avec } hp = H - Dh \qquad (8.2)$$

Vp désigne les réserves permanentes et **hp** est la puissance des aquifères non affectés par les fluctuations de la nappe;

Dh est la variation du niveau piézométrique tel que défini précédemment;

H est l'épaisseur moyenne des niveaux aquifères. Dans le bassin hydrogéologique des Yaérés, le mur imperméable des niveaux aquifères profonds est mal connu. Il est donc difficile d'estimer l'épaisseur des niveaux aquifères saturés, de même que leur capacité d'emmagasinement. Ainsi, nous

n'avons pris en considération dans les calculs que les niveaux aquifères superficiels. Dans ce cas, l'épaisseur moyenne saturée est d'environ 6 m.

$$\underline{Vp = 1,08*10^9\ m^3}.$$

8.1.4. Ressources exploitables en eaux souterraines.

Débit d'eau souterraine qui peut être tiré des horizons aquifères, compte-tenu des conditions rationnelles, techniques et économiques, sans altération du régime d'exploitation et de la qualité de l'eau. Ces ressources dépendent donc en premier lieu des conditions hydrogéologiques.

La quantité d'eau soutirée directement des aquifères du Quaternaire par les ouvrages d'exploitation (puits et forages) par pompage ou par gravité n'est pas bien connue pour plusieurs raisons : la sous-utilisation des forages du fait des pannes mécaniques et de l'énergie humaine qu'exige leur manipulation.

Nous avons estimé l'exploitation actuelle des eaux souterraines ou les besoins en eaux potables des populations de façon indirecte sur la base de consommations unitaires moyennes et des chiffres du 2e recensement général de la population fait en 1987 et publié en 1991.

Le Grand Yaéré, pour une superficie d'environ 16000 Km^2 regroupe environ 800000 habitants. En admettant que le périmètre choisi englobe 1/3 environ de cette population, si nous considérons que cette population prélève dans la nappe 30 litres par jour par habitant, on obtient alors un débit d'exhaure d'environ $3*10^6$ m^3/an soit un débit fictif d'exploitation d'environ 95 l/s.

Par rapport aux ressources régulatrices, le débit d'exploitation est encore très faible, ce qui signifie que les réserves actuelles peuvent permettre de faire face à une

exploitation intense sans que l'écoulement souterrain soit perturbé.

8.1.5. Evaluation des ressources en eaux souterraines renouvelables naturelles à partir des données hydrologiques.

8.1.5.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle.

On groupe sous le terme d'évapotranspiration, l'évaporation physique fonction du pouvoir évaporant de l'atmosphère, agissant sur les surfaces d'eau libres et à la surface du sol, et l'évaporation physiologique qui représente la quantité d'eau évaporée par la transpiration des végétaux.

Un grand nombre de méthodes existent pour évaluer l'évapotranspiration (méthodes directes, analytiques et empiriques). Les méthodes directes et analytiques sont assez difficiles à mettre en oeuvre. Pour la méthode empirique, Il existe plusieurs formules utilisées dans les zones semi-aride ou aride : formule de Turc, formule de Bouchet, formule de Thornthwaite, formule de Serra... Les deux premières requièrent la connaissance d'un important nombre de composantes dont nous ne disposions pas. Nous avons estimé l'évapotranspiration potentielle (ETP, quantité d'eau qui pourrait être évapotranspirée si le sol contenait en permanance une quantité d'eau suffisante) à partir des formules de Thornthwaite et de Serra.

i) - Formule de THORNTHWAITE C.W. Thornthwaite a développé en 1948, par corrélation entre la température moyenne de l'air et le taux de transpiration des plantes, la formule suivante :

$$\mathbf{ETP = 16*K*(10*t/I)^a} \qquad \mathbf{(8.3)}$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle en mm; **t** : température moyenne mensuelle de l'air en °C;

K : facteur de correction pour la longueur du jour, le nombre de jour du mois et la latitude. Ce facteur est donné par des tables en fonction de la latitude. Quand il n'est pas connu, la formule de Thornthwaite est dite non corrigée;

I : total des 12 valeurs mensuelles de l'indice de chaleur $i=(t/5)^{1,514}$;

$$a=6,75*10^{-7}*I^3-7,71*10^{-5}*I^2+1,79*10^{-2}*I+0,49 \qquad (8.4)$$

ii) - Formule de SERRA. Il s'agit en fait d'une forme corrigée de la formule de Thornthwaite.

$$ETP = 16*(10*t/I)^a \qquad (8.5)$$

Dans ce cas, $i=0,09*t^{3/2}$ et $a=1,6*I/(100+0,5)$

iii) - Résultats de l'ETP.

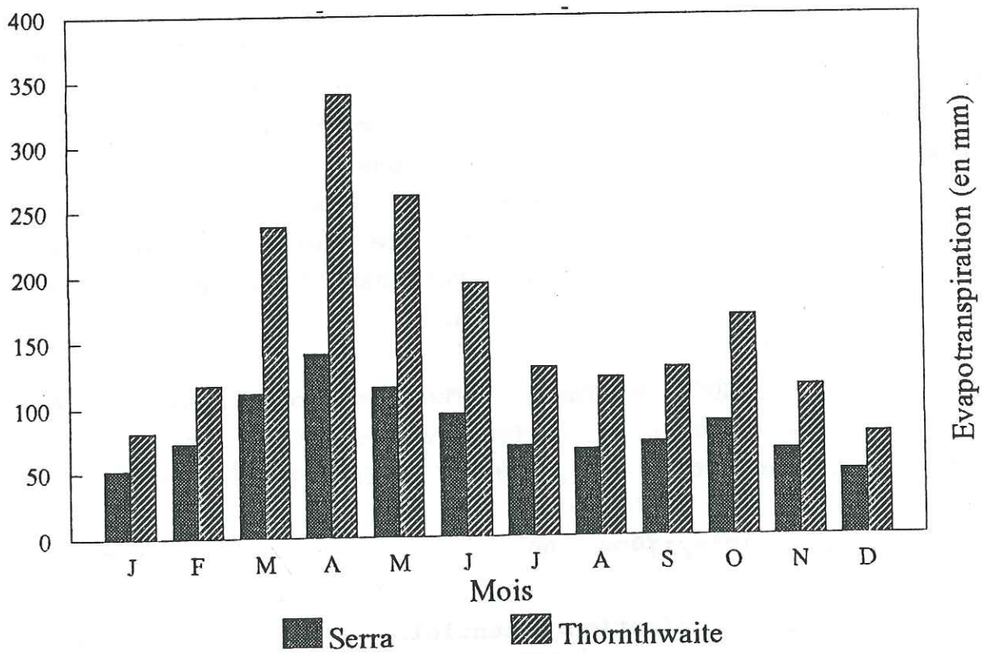


Figure 8.2. Histogramme de distribution de l'évapotranspiration potentielle (Serra et Thornthwaite) moyenne mensuelle à la station de Maroua-Salak (1980-1989).

L'application des méthodes empiriques donne des valeurs de l'ETP très différentes suivant la formule employée : l'ETP Thornthwaite est presque toujours le double de l'ETP Serra (tableau 8.1).

Tableau 8.1. Evapotranspiration potentielle moyenne mensuelle et annuelle d'après les formules de Thornthwaite et de Serra à la station de Maroua-Salak (1980-1990).

Méthode	Période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
ETP Thornthwaite		112,78	151,91	268,50	377,16	285,53	194,16	134,79	122,75	157,36	183,99	146,43	78,23	2213,59
ETP Serra	1980	66,91	88,18	120,68	153,29	121,88	94,14	71,86	67,72	83,42	93,13	81,57	52,09	1094,88
ETP Thornthwaite		66,58	132,21	248,82	331,41	260,90	241,92	137,94	143,49	145,85	201,29	129,31	110,72	2150,43
ETP Serra	1981	46,58	81,10	116,39	142,68	116,39	111,78	74,00	76,61	80,19	100,81	75,74	67,34	1089,61
ETP Thornthwaite		107,25	116,91	268,83	328,12	278,06	218,11	159,95	128,85	141,90	135,30	112,34	97,56	2093,18
ETP Serra	1982	66,14	75,28	125,15	144,38	123,93	105,53	83,36	71,87	79,70	77,03	69,37	62,25	1084,00
ETP Thornthwaite		45,33	125,85	188,67	359,72	387,12	228,59	154,23	140,94	150,39	184,03	142,21	120,10	2227,19
ETP Serra	1983	35,39	77,99	95,17	150,34	153,13	106,84	79,78	75,34	81,61	94,15	80,69	71,07	1101,50
ETP Thornthwaite		80,31	138,09	300,57	344,37	216,69	215,90	153,65	157,23	147,48	204,65	161,00	90,33	2210,29
ETP Serra	1984	52,61	82,28	130,28	143,35	100,12	101,19	78,63	80,44	79,53	100,12	87,00	57,55	1093,12
ETP Thornthwaite		145,33	108,90	288,79	338,05	306,56	215,45	133,25	134,03	137,72	275,53		101,34	2184,93
ETP Serra	1985	87,14	75,42	142,05	159,70	143,36	111,83	77,15	78,03	82,50	138,17		67,15	1162,52
ETP Thornthwaite		98,69	177,88	301,10	348,26	307,98	221,72	143,38	133,70	135,42	168,66	155,23		2192,01
ETP Serra	1986	64,98	107,77	145,18	161,69	142,54	113,31	80,93	77,38	80,93	95,22	92,24		1162,17
ETP Thornthwaite		109,58	159,32	264,05	323,44	351,91	213,54	197,32	139,32	161,39	208,33		119,29	2247,50
ETP Serra	1987	69,40	97,89	129,50	150,29	154,42	108,50	100,99	78,77	90,88	109,61		74,41	1164,65
ETP Thornthwaite		97,36	139,24	314,35	739,34	329,61	216,49	139,60	114,03	123,02	148,46	126,67	92,91	2581,09
ETP Serra	1988	58,84	80,33	129,25	232,97	129,25	98,01	71,52	62,62	68,19	77,62	71,52	57,37	1137,49
ETP Thornthwaite		58,09	80,37	201,14	232,88	244,19	188,02	139,34	138,05	148,19	178,42	176,26	94,91	1879,86
ETP Serra	1989	43,94	60,00	108,20	120,65	120,65	100,74	79,52	79,52	86,85	99,70	101,78	63,77	1065,29
ETP Thornthwaite		134,90	112,84			230,75	209,61	148,39	151,07	157,37	178,72			1323,65
ETP Serra	1990	117,79	109,03			179,61	167,30	119,79	122,82	133,23	149,73			1099,30

La figure 8.2 montre que dans les deux cas, en année moyenne, les valeurs moyennes mensuelles élevées s'observent

en saison sèche tandis que les faibles valeurs correspondent à la saison de pluies. la distribution des valeurs est bimodale : on a un pic en avril (fin d'étiage) et un autre en octobre (fin saison humide). La corrélation des résultats des deux méthodes avec les valeurs d'évaporation Piche obtenues à la même station n'est pas bonne.

Les valeurs moyennes annuelles obtenus par la formule de Thornthwaite sont proches de ceux obtenus par **Olivry** (1986) en utilisant la formule de Turc, à la même station. Les résultats du tableau 8.1 sont utilisés conjointement pour le calcul du bilan.

8.1.5.2. Evaluation de la pluie efficace par la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite.

C'est une méthode comparative entre l'ETP, les précipitations et la réserve utile du sol.

La réserve utile (RU) comprend deux réservoirs : l'un, totalement accessible à l'évaporation, la réserve facilement utilisable (RFU), l'autre, la réserve de survie des végétaux (Rs) dans laquelle une restriction évapotranspiratoire s'opère du fait des phénomènes biologiques (fermeture des stomates) et physique (forces de capillarité) (**Malou** et al, 1991).

D'après les travaux de **Seiny-Boukar** (1990), la réserve maximale en eau disponible dans le sol pour la vie des végétaux est de l'ordre de 60 mm pour l'ensemble des sols (sols argileux de la famille vertisolique, sols ferrugineux à dominance sableuse) du Grand Yaéré.

Malou et al (1991) estiment qu'à ce stade d'humidité du sol, l'évapotranspiration réelle est inférieure à sa valeur potentielle et la quantité d'eau prélevable dans la réserve du sol est réglée par un coefficient K dont la formule est la suivante :

$$K = Hd/Rs \qquad (8.6)$$

Hd est l'eau disponible et **Rs** la réserve de survie des végétaux. Si Hd dépasse la réserve de survie (K > 1), K est alors fixé à 1 et ETR = ETP.

La réserve utile du sol représente le volume maximal d'eau disponible dans le sol au-delà duquel tout excédent de pluie est disponible pour l'écoulement et l'infiltration. Dans le cadre de cette étude, nous avons estimé ce volume ou stock à 100 mm d'eau.

Tableau 8.2. Bilan de l'eau d'après les moyennes mensuelles de l'évapotranspiration potentielle (Serra et Thornthwaite) et des précipitations à la station de Maroua-Salak (1980-1989).

Mois	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	Annuelle
Pluie (P)	14,43	55,28	93,89	185,02	261,49	101,20	13,13	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	725,57
ETP Thornthwaite	339,93	261,67	194,04	129,61	121,31	128,73	168,03	114,95	78,61	81,17	117,13	238,08	1973,30
Stock	0,00	0,00	0,00	55,41	100,00	72,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ETR	14,43	55,28	93,89	129,61	121,31	101,20	13,13	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	528,85
Pluie efficace					95,59								95,59
ETP Serra	140,90	115,13	94,33	69,67	66,95	72,29	87,59	65,99	49,85	52,25	72,83	111,23	999,06
Stock	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	25,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ETR	14,43	55,28	93,89	69,67	66,95	72,29	13,13	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	386,77
Pluie efficace				15,35	194,54	28,94							238,83

Le bilan hydrique a été calculé à partir des Valeurs moyennes mensuelles d'ETP et de précipitation sur 10 ans (1980 à 1989). Les résultats sont consignés dans le tableau 8.2. Le calcul démarre à la fin de l'étiage (avril) où la RFU est considérée comme nulle. Ce tableau montre qu'en saison sèche (octobre-novenbre à mai-juin), l'évapotranspiration vidange toutes les réserves hydriques du sol. Entre juillet et

septembre, les fortes précipitations prennent le dessus et permettent la reconstitution des réserves hydriques du sol et la recharge des nappes souterraines. Les pluies de début (avril-juin) et de fin (octobre) de saison de pluie profitent très peu aux nappes. Suivant les deux méthodes de calcul, ce sont les pluies du mois d'août qui reconstituent l'essentiel des ressources régulatrices (figure 8.3).

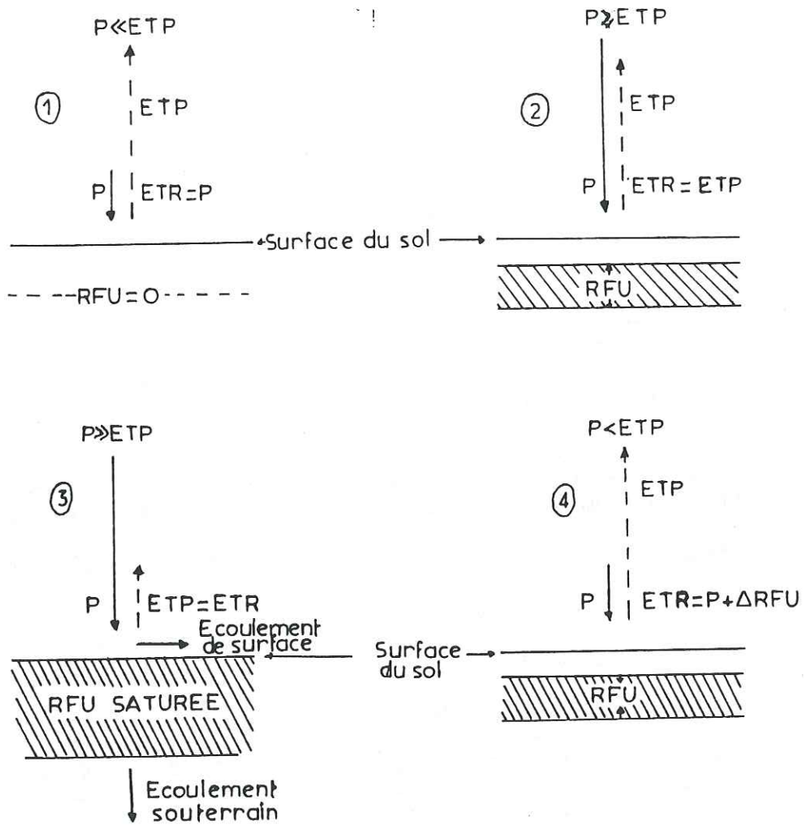


Figure 8.3. Schéma de synthèse des différents cas du calcul du bilan hydrique de Thornthwaite à la station de Maroua-Salak (inspiré de **Mégnien**, 1979).

1 Octobre à Juin; 2 Juillet; 3 Août; 4 Septembre.

Pour un stock d'eau de 100 mm, les méthodes utilisées donnent des valeurs moyennes annuelles des excédents du bilan différentes : environ 100 mm par l'ETP de Thornthwaite et plus de 200 mm par l'ETP de Serra. La valeur de 200 mm paraît grande. Si nous considérons par hypothèse que la valeur vraie est la moyenne des résultats entre les chiffres donnés par les deux formules, alors, le tableau 8.3 permet d'apprécier les résultats intermédiaires.

Tableau 8.3. Bilan intermédiaire établi d'après la moyenne des résultats des formules de Serra et de Thornthwaite.

Mois	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	Annuelle
Pluie (P)	14,43	55,28	93,89	185,02	261,49	101,20	13,13	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	725,57
ETP Intermdiaire	240,42	188,40	144,19	99,64	94,13	100,51	127,81	90,46	64,23	66,74	94,98	174,66	1486,20
Stock	0,00	0,00	0,00	85,38	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ETR	14,43	55,28	93,89	99,64	94,13	100,51	13,13	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	472,14
Pluie efficace					152,74	0,69							153,43

8.1.6. Confrontation des résultats.

Les ressources en eau totales renouvellables naturelles obtenues à partir de la différence entre les précipitations atmosphériques et l'évapotranspiration représentent le débit naturel annuel moyen de l'écoulement total (**Castany**, 1979).

En réalité, les ressources en eau souterraines renouvellables naturelles sont égales à la fraction des précipitations efficaces qui franchit la surface du sol et que l'on désigne par : **infiltration efficace.**

Le calcul de l'infiltration éfficace à partir d'un battement moyen de la surface piézométrique des nappes de 1,5 m donne, pour une porosité moyenne de 6 %, une lame d'eau de 90 mm/an.

Les trois méthodes appliquées pour le calcul du bilan suggèrent que malgré la difficulté d'évaluer la part de l'écoulement de surface dans l'excédent du bilan, on peut avoir une infiltration efficace formelle de 90 mm/an.

La comparaison des ressources régulatrices et des réserves permanentes montre que le taux de renouvellement des aquifères (pourcentage des apports annuels en eau par rapport à la réserve totale) est de l'ordre de 33,4 %. Ainsi, théoriquement, 3 ou 4 années suffisent pour assurer effectivement le renouvellement de la réserve totale.

A l'échelle du périmètre représentatif, les prélèvements ne constituent que 1 % de la ressource régulatrice. A ce rythme et pour les seuls besoins domestiques, il faut environ 100 ans pour que le déséquilibre entre les prélèvements et les ressources régulatrices soit perceptible.

Ce calcul très optimiste, garde un caractère très théorique car, à l'échelle locale, ces chiffres masquent une hétérogénéité des terrains. **Toutefois, ces résultats font bien apparaître que les problèmes de l'eau dans le Grand Yaéré sont plus des problèmes de maîtrise de limplantation des ouvrages de captage que des problèmes de gestion.**

8.2. Synthèse des connaissances hydrodynamiques par des méthodes de simulations numériques.

8.2.1. Généralités.

Dans le Grand Yaéré, la dynamique des systèmes aquifères est très complexe. Le nombre de paramètre interactifs et de variables à prendre en considération est très large. En effet, les techniques de simulation des aquifères offrent des outils valables d'abord pour comprendre le comportement spatial et temporel d'un système aussi complexe, ensuite pour prévoir sa réponse aux différentes stratégies d'exploitation, enfin pour

planifier l'exploitation de la ressource, donc la gérer au mieux selon l'objectif choisi.

L'étude géochimique a démontré l'homogénéité des masses d'eaux souterraines et par conséquent une continuité relative des aquifères de part et d'autre de la région. Ainsi, les modèles les plus aptes pour la simulation du comportement hydrodynamique des systèmes aquifères du Grand Yaéré sont des modèles numériques dont le principe de base est la continuité de l'écoulement en milieu poreux. La solution la plus représentative du fonctionnement des systèmes aquifères pourra donc être obtenue par approximations successives sur l'équation de continuité suivant la méthode des différences finies. Nous avons décrit dans le détail les principes de base théoriques de cette méthode (**Ngounou Ngatcha**, 1992).

L'évolution des idées concernant l'interprétation des systèmes aquifères du Grand Yaéré oblige à modifier sensiblement la conduite des tests reclamés par la construction des modèles. La synthèse qui est faite dans cette rubrique offre des données qui pourront servir de référence à la mise en place d'un tel outil que le Centre de Recherche Hydrologiques de Yaoundé envisage d'utiliser pour la gestion des ressources en eau du Nord Cameroun.

8.2.2. Résultats analytiques nécessaires pour la construction du modèle.

Jusqu'à présent, de nombreux chercheurs, par analogies aux considérations faites dans d'autres zones climatiques sahéliennes, admettent que l'évapotranspiration est le principal mode de vidange des systèmes aquifères du Grand Yaéré, même dans les secteurs où la surface libre des nappes est relativement profonde (-30 à -60 mètres). Dans la perspective d'une étude par modèle mathématique de ces systèmes, il devait être question de tester l'hypothèse d'une vidange prépondérante par évapotranspiration.

Il est clair, au vu de l'étude des anomalies piézométriques, que la relation liant la vidange de la nappe profonde à l'évaporation n'est plus applicable : l'évaporation n'a acune influence sur les niveaux aquifères profonds. Même s'il faut admettre qu'en période d'étiage et en certains zones, des pertes d'eau de la nappe à travers sa surface libre peuvent avoir lieu à -10 mètres par évaporation, ces pertes n'ont pas l'ampleur qu'on leur a souvent accordé; elles ne sont pas synchrones sur toute l'étendue de la région, du fait du recouvrement argileux de surface.

En effet, la relation oxygène-18/niveaux statiques (cf. figure 7.10) a montré que les niveaux affectés par l'évaporation concernent surtout les nappes perchées dont la surface n'est pas masquée par un recouvrement d'argile. Ces types de nappes ne jouent cependant pas un grand rôle dans le schéma du fonctionnement global des systèmes aquifères du Grand Yaéré.

On a toujours schématisé les aquifères du Quaternaire du Grand Yaéré comme une nappe généralisée, homogène et monocouche. Dans ce contexte, on expliquait les niveaux d'eau très profonds dans la partie aval du cordon sableux comme la conséquence d'une vidange par l'évaporation. Nos coupes géologiques ont révèlé dans cette portion de la nappe en particulier et dans le bassin hydrogéologique des Yaérés en général, la présence de deux niveaux aquifères distincts. L'étude de la surface piézométrique a également mis en évidence en aval du cordon sableux, deux charges hydrauliques différentes; liées à la superposition de deux aquifères : superficiels et profonds appartenant aux formations du Quaternaire. La géochimie a permis de vérifier et de confirmer les résultats géologiques et hydrodynamiques (cf. figure 7.11).

Le système aquifère du piémont est constitué par la juxtaposition et la superposition de réservoirs différents : alluvions et altérites. Ce système et les niveaux aquifères

superficiels des Yaéré ne sont pas en communication hydraulique. **Leurs eaux se mélangent en aval du cordon sableux, suivant un axe de drainage qui constitue leur exutoire naturel et la zone de recharge des niveaux aquifères profonds des Yaérés.** En définitive, le choix du modèle doit tenir compte de la discontinuité des aquifères : de type monocouche dans le piémont et de type bicouche dans les Yaérés.

Les limites des unités hydrogéologiques pourront être ajustées aux limites des cours d'eau en respectant l'ordre de grandeur de leur surface ainsi que leur position relative. Le choix de telles limites tient au fait qu'elles marquent des échanges de flux avec la nappe. Ainsi, elles permettent de mieux représenter les conditions hydrogéologiques à l'échelle régionale (figure 8.4).

L'étude de l'évolution de la nappe dans le temps a montré que pour le moment, la piézométrie ne présente pas de variations importantes. Les aquifères sont encore très peu exploités : les débits cumulés de pompage restent faibles, réduisant ainsi leur influence sur la dynamique du système aquifère. Dans ces conditions (régime d'écoulement quasi-permanent, représentatif des basses eaux moyennes), l'étude du fonctionnement hydrodynamique par modèle numérique, demeurerait descriptive. Elle n'apporterait pas non plus de résultats fondamentaux : l'aspect quantitatif échappant dans ce cas totalement à l'analyse par manque des renseignements sur le coefficient d'emmagasinement, sur la drainance, l'effet de limites, la réalimentation...

Sur le terrain, nous avons remarqué que des dénoyages partiels de l'aquifère étaient possibles dans quelque forages en saison sèche (la période d'étiage est suffisamment longue, 7 à 8 mois). Ainsi, l'utilisation des modèles pour être efficace - c'est-à-dire permettre l'optimisation des ressources en eau de la nappe qui pourrait largement contribuer à la réalisation des futurs plans d'aménagement de

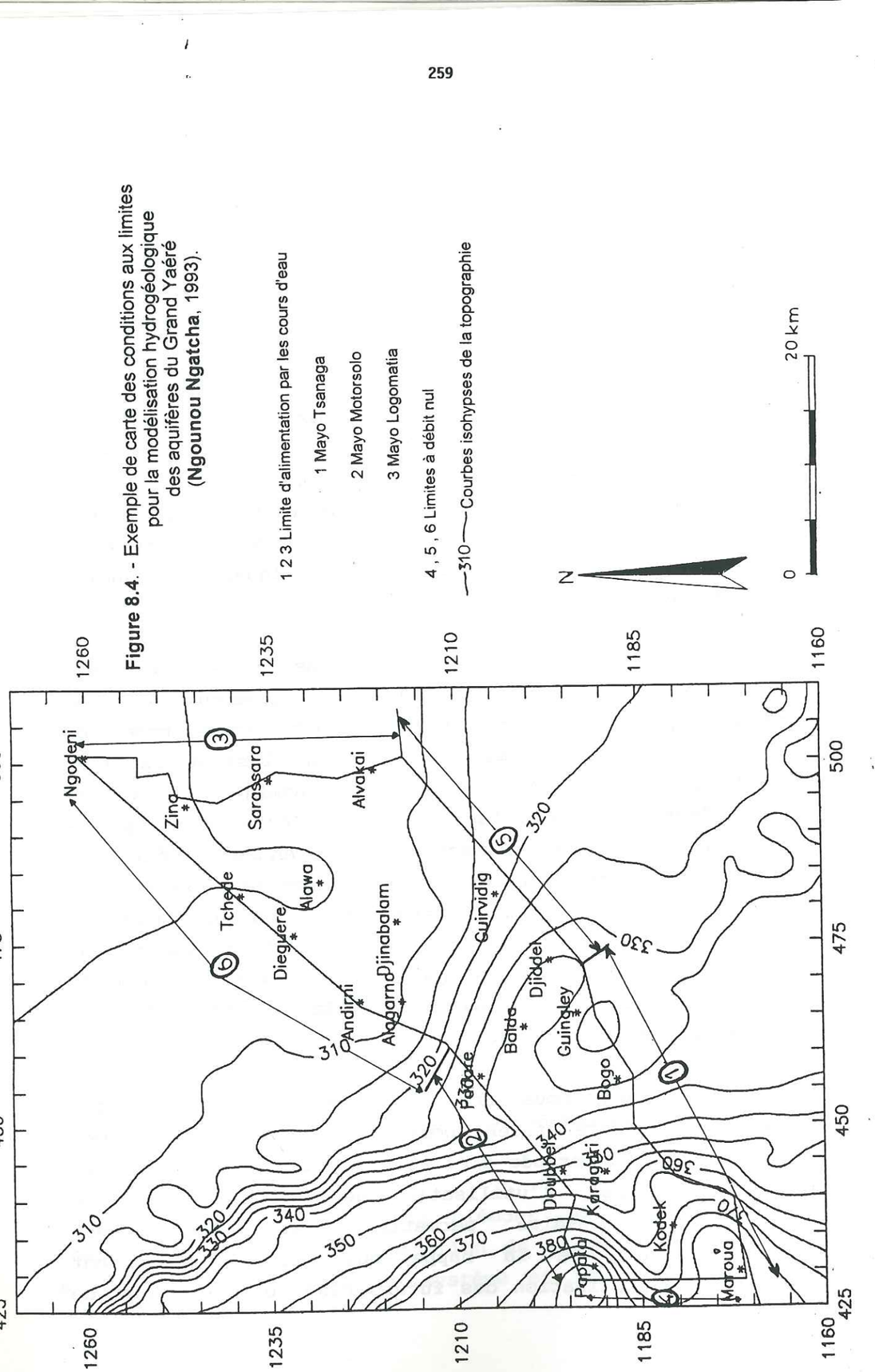


Figure 8.4. - Exemple de carte des conditions aux limites pour la modélisation hydrogéologique des aquifères du Grand Yaéré (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

cette région dont le fichier démographique est le plus important au Cameroun -, doit être étalonné dans le temps et à des époques différentes.

En définitive des mesures complémentaires précieuses pour le calage du modèle en régime transitoire, auront leur place dans une reconnaissance hydrogéologique générale des systèmes aquifères du Grand Yaéré. Il convient de mettre en place des méthodes nécessaires et suffisantes pour l'obtention des paramètres souhaités, avec la meilleure densité et une bonne fiabilité. Il s'agit notamment :

- de l'amplitude des fluctuations piézométriques saisonnières et de l'infuence des fluctuations des niveaux des cours d'eaux sur ceux des nappes. Actuellement, un essai de mesure de l'infiltration in-situ est en cours d'exécution par le Centre de Recherches Hydrologiques de Yaoundé. La méthode consiste à mesurer avec précision les variations piézométriques induites par les cours d'eau. Ainsi, deux limnigraphes ont été installés respectivement dans un piézomètre et le cours d'eau dans deux localités différentes; Petté et Zina.

- de l'influence de la recharge de la nappe par le cordon sableux qui pourra être mise en évidence par l'étude du transfert de l'eau à travers cette formation;

- des données sur la géométrie des aquifères profonds.

8.2.3. Objectifs du modèle.

Le progrès des connaissances permet de faire une nouvelle approche des objectifs auxquels devront repondre désormais, la préparation d'un modèle simulant l'ensemble des aquifères du Grand Yaéré. Il s'agira notamment de vérifier :

- les estimations de la recharge par drainage des cours d'eau et des eaux des zones de stagnation (mares) vers la

nappe. On devrait également vérifier les apports à partir du cordon sableux;

- la répartition des paramètres hydrodynamiques disponibles; transmissivités, porosité...

- l'hypothèse de la vidange des nappes superficielles par écoulement profond;

- la structure des différents aquifères dans les différents bassins;

- les transferts hydrauliques dans le bassin hydrogéologique des Yaérés entre les différents niveaux aquifères.

Au regard des différents objectifs, l'étude par modèle ne présentera un grand intérêt pour la région que dans la mesure où il sera possible de la reprendre, chaque fois que la masse de données nouvelles sera susceptible d'apporter une meilleure précision.

8.3. Conclusion.

L'absence de mesures précises sur les fluctuations en hautes et en basses eaux, et sur le réservoir utile ne permet d'avoir qu'une approximation sur les potentialités des réservoirs aquifères du Quaternaire.

Les essais réalisés ne sont pas assez précis pour donner une valeur à la recharge des aquifères, toutefois, ils sont d'un intérêt capital d'un point de vue méthodologique.

Dans la perspective de modélisation des systèmes aquifères du Grand Yaéré, il serait hasardeux de vouloir interpréter la vidange des nappes profondes par l'évaporation. Une telle tentative ne correspondrait pas à une réalité hydrogéologique mais uniquement mathématique.

De plus en plus, l'évaluation des ressources en eaux des systèmes aquifères par les méthodes classiques est ensuite testée sur modèles mathématiques de simulation hydrodynamique. Dans notre secteur d'étude, l'insuffisance des données numériques de base ne permet pas de dresser par ces méthodes, un état complet des termes du bilan des systèmes aquifères du Quaternaire.

Chapitre 9.

POSSIBILITES DE DEVELOPPEMENT DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES.

9.1. Introduction.

9.2. Possibilités d'exploitation des nappes.

9.3. Vunérabilité des nappes à la pollution.

9.1. Introduction.

Atteindre les objectifs de développement des collectivités humaines passe par la satisfaction de leurs besoins en eau, donc par la mise en valeur et la protection à long terme des ressources. La prévision du comportement technique des ensembles aquifères s'impose donc pour éviter par avance des difficultés et préparer les aménagements (**Emsellem et Margat**, 1971).

9.2. Possibilités d'exploitation des nappes.

9.2.1. Introduction.

Jusqu'en 1983, ce sont les puits qui étaient les plus utilisés dans la région. Le dénoyage de ces puits à la suite de la sécheresse de 1982/1983 a incité le gouvernement à lancer un programme d'urgence d'hydraulique villageoise. Ce programme qui se poursuit encore a permis de compléter le réseau de puits existant par de nombreux forages équipés de pompes à motricité humaine.

Malheureusement, ces forages ne sont généralement utilisés que pendant la saison sèche (après tarissement des eaux de surface ou des puisards) soit quelque mois seulement au cours de l'année. De plus, la fréquence des pannes de pompe prive régulièrement plusieurs localités d'eau potable pendant plusieurs mois de l'année.

Les eaux souterraines sont essentiellement utilisées pour les besoins en eau potable des populations urbaines et rurales. Pour le moment, l'irrigation agricole se fait à partir des eaux de surface. De plus, les besoins en eau du bétail sont surtout assurés par les cours d'eau en période de crue et par les mares en étiage.

Malgré le grand nombre de forages d'eau déjà réalisés dans la région, des inconnues subsistent encore à propos des critères d'implantation. Très souvent, le choix du site de certains forages est dicté par le "Lamido" (Chef de village). Par ailleurs, en raison des techniques employées (par exemple l'emploi des pompes à débits constants), les débits pompés sont encore très faibles par rapport au réserves potentielles. Celà démontre que l'exploitation de la nappe peut être intensifiée. Schématiquement, le problème posé est de savoir pour chaque bassin hydrogéologique individualisé, celui qui est mieux adapté aux programmes d'hydraulique.

9.2.2. Exploitation du système aquifère du piémont.

Les alluvions et les altérites qui constituent les réservoirs de ce système, sont en étroite communication avec les cours d'eau. Les lits des cours d'eau qui sont formés d'alluvions très perméables sont bien alimentés : ils contribuent de manière appréciable à l'entretien du niveau des nappes souterraines (cf. figure 3.4).

La couverture n'est pas représentée partout par la même couche; ce sont soit les "argiles de surface", soit les sables qui peuvent être directement alimentés (cas des dunes et du cordon sableux).

Bien que les localités et les habitats soient très dispersés, beaucoup d'arguments sont en faveur de l'exploitation directe et disséminée des eaux des aquifères du piémont dans le cadre des programmes d'hydraulique urbaine et rurale :

- Ce sont des nappes libres ayant des réservoirs à forte capacité d'emmagasinement.

- Leur aire de recharge est très large et l'eau est accessible;

- Les investissements que leur exploitation nécessite sont facilement supportables.

- Les eaux sont à la portée de nombreux agents économiques individuels ou collectifs et à proximité des lieux d'utilisation.

Dans le piémont, il est possible d'exploiter en tout point et en toute saison des volumes d'eau appréciables. L'étude de la distribution des débits de forages existants a montré que le débit moyen est de 1,8 m^3/h, ce qui signifie qu'on peut obtenir par ouvrage environ 40 m^3/jour de quoi alimenter une localité d'environ 1000 habitants à raison de 40 litres d'eau/jour/habitant.

En réalité, si l'on tient compte des caractéristiques de l'ouvrage dont l'équipement est généralement une pompe manuelle, la capacité d'exhaure est ramenée entre 5 et 10 m^3/jour. La satisfaction des besoins en eau modérés de petites communautés rurales ne pose donc en principe aucun problème majeur.

En raison des faibles débits recherchés, les dispositifs d'exploitation très variés; puits et forages, sont convenables et praticables. Nonobstant les conditions sociologiques ou économiques de certaines localités qui sont favorables à un équipement par puits de grand diamètre (moyen d'exploitation peu onéreux) dont la souplesse d'utilisation (débit de puisage) et la sécurité (absence de panne) sont de gros avantages, il est de plus en plus évident qu'à long terme, l'avenir est au forage, seule technique en mesure de répondre à l'urgence et à l'ampleur des besoins et fournir une eau de qualité acceptable.

Par ailleurs, le taux de renouvellement des nappes étant surtout conditionné par le climat, cela implique qu'en cas d'une aridité prolongée, les puits qui exploitent très souvent les niveaux supérieurs des nappes seulement, seront plus

exposés à l'épuisement que les forages qui exploitent la totalité des aquifères.

Dans le piémont, afin d'exploiter les forages avec le meilleur rendement, indépendamment des caractéristiques des pompes, les forages éloignés des axes d'alimentation potentiels ne doivent pas être arrêtés avant le socle sain. De plus, l'absence de zones fissurées ou fracturées sous les altérites et dans le socle sain sous-jacent ne permettent pas de multiplier les forages car, il se poserait aussitôt le problème de l'équilibre d'alimentation des nappes et celui de la limite des réserves disponibles.

Pour les localités (comme Bogo, Balda, Fadaré, Petté...qui regroupent plus de 5000 habitants) qui nécessitent des débits supérieurs à 5 m^3/h par forage, les relations existant entre le réseau hydrographique ainsi que les zones d'inondation et les nappes, constituent les critères importants de localisation des forages dans les alluvions superficielles.

Pour de telles localités, on peut rationnaliser l'utilisation de ces forages en les dotant de moyens d'exhaure plus performants. Par exemple, à l'aide de groupes électrogènes, on peut constituer des réserves dans des citernes ou petits châteaux d'eau de 6 à 10 m^3, ce qui permet de stocker l'eau qui est ensuite distribuée sur place ou à petite distance à l'aide de robinets. Cette pratique qui a démontré son efficacité dans certains villages du Sud Cameroun est également d'une grande utilité pour le Nord Cameroun.

9.2.3. Exploitation du système aquifère alluvionnaire du Quaternaire des Yaérés.

C'est un système aquifère stratifié constitué par des dépôts sédimentaires variés et très hétérogènes (couches alternantes de sables, d'argiles superposées et juxtaposées, souvent biseautées). Il comporte une nappe libre supérieure

alimentée par les cours d'eau et les eaux d'inondation. En profondeur, on a un niveau aquifère alimenté par drainance des eaux de la nappe libre supérieure.

Dans le Yaéré, le problème de l'exploitation des ressources en eau des aquifères superficiels s'apparente au cas du piémont. Cependant, en raison de l'établissement des zones d'inondation dans cette plaine, l'implantation des forages n'y est pas très développée.

En aval du cordon sableux, (axe Alagarno-Andirni), les niveaux profonds offrent de meilleurs capacités de production; débits spécifiques de l'ordre 3 $m^3/h/m$ et transmissivité proche de 10^{-3} m^2/s à Alagarno. Suivant l'axe Tagawa-Waza-Ndiguina, qui se prolonge parallèlement à la frontière Nigéria-Cameroun, la présence d'une importante couche d'argile réduit l'intérêt et la possibilité d'exploitation des aquifères profonds. Les points d'eau sont donc difficiles à localiser. La proportion de réussite est encore faible. Le plus difficile reste de déterminer avec précision les limites de zones stériles résultant de variations de la sédimentation ou de "biseaux secs" aux limites de la nappe. Selon **Lemoine J.** (1978), les profils de sondages électriques perpendiculaires aux limites présumées, calés sur quelques sondages mécaniques de reconnaissance, et éventuellement complétés par des mesures sismiques, permettent en général d'identifier les poches d'argiles.

Dans ce secteur à niveaux aquifères superficiels stériles, il existe des niveaux aquifères localisés (nappes perchées) qui conviennent mieux que les aquifères profonds à l'hydraulique villageoise : les niveaux de l'eau y sont habituellement très proches du sol. Ces nappes peuvent permettre l'alimentation des villages de Ardori, Omaka, Boundéri, Touchki dans de bonnes conditions. Dans le cas contraire, il faut recourir aux aquifères du Continental terminal qui se trouvent à plus de 150 mètres de profondeur.

Les connaissances sur ces aquifères sont encore insuffisantes. Leur développement nécessite une analyse préalable de l'intérêt socio-économique des localités à prospecter par rapport au coût des opérations à engager et aux résultats escomptés. Les résultats obtenus à Waza où, pour les besoins hôteliers du Parc national de réserve de la même localité, deux forages profonds débitant chacun 10 m^3/h (ce qui représente en toute saison un débit total d'environ 240 m^3/jour) fonctionnent en alternance, prouvent que les aquifères profonds peuvent fournir des débits importants.

Au Niger, on a des puits pastoraux de grand diamètre efficace jusqu'à 80 mètres et parfois même 100 mètres. Ce type d'exhaure pratiqué à Tagawa et Touchki n'a pas connu de succès. Il est à proscrire car, le contexte hydrogéologique est différent de celui du Niger. En effet, au Sahel et au Niger en particulier, la nappe exploitée est une nappe captive. L'aquifère profond est d'abord capté à l'aide d'un forage. En fonction de sa pression au point de forage, l'eau remonte à une cote plus ou moins élevée. Lorsqu'elle s'équilibre à une profondeur modérée, on accole au forage un "contre-puits" en communication avec lui. Le puisage se fait généralement à la main ou à l'aide de la traction animale avec plusieurs poulies.

Actuellement, les exploitations par forages avec pompe à motricité humaine dans les niveaux profonds ne concernent qu'un nombre très restreint de localités. Des forages de ce type peuvent être exploitables pour l'alimentation en eau de groupement ruraux. Cependant, cette technique bien que moins onéreuse, est inefficace.

En effet, la puissance fournie par l'homme moyen est évaluée à 0,08 CV, ce qui correspond, avec un rendement mécanique de 1/1 à la pompe, à l'exhaure d'un débit de 2,2 m^3/h si la nappe est à 10 m de profondeur, de 760 l/h à 30 m, de 430 l/h à 50 m et de 280 l/h à 80 m. Il faut noter qu'on

trouve difficillement des pompes manuelles permettant d'exploiter convenablement un forage ayant un niveau dynamique à plus de 40 mètres.

A Alagarno Gouna, nous avons passé plus d'une heure pour tirer 400 litres d'eau dans un forage d'environ 90 mètres de profondeur, ce qui nous a permis de comprendre pourquoi les ouvrages profonds sont peu utilisés. Les populations locales retournent aux points d'eau traditionnels (mares et puisards) qui ont le triple inconvénient d'être temporaires, malsains et souvent éloignés des lieux d'habitations.

Malgré les inondations dont la plaine des Yaérés est le siège, les aménagements hydro-agricoles (SEMRY, SODECOTON...) ont rendu la vie économique et sociale très intense dans plusieurs localités de cette plaine notamment : Guirvidig, Logone-Birni, Maga, Moulvouday, Pouss...

Si l'on se place donc dans une perspective à long terme, il vaut mieux utiliser le forage avec pompe à moteur. Cette technique qui n'est justifiée que par la recherhe d'importants débits ponctuels et la perspective d'une exploitation intensive des ressources, dépasse donc de loin l'échelle de l'hydraulique villageoise. Elle permet de diminuer la peine des usagers et de réaliser un seul forage à la place de 5 forages avec pompe à motricité humaine. Mais, le véritable problème demeure celui de la desserte des habitats très dispersés.

L'absence de coupes de forages détaillées rend très difficile toute tentative d'extrapolation des conditions hydrogéologiques rencontrées dans les formations profondes. Bien qu'à l'état actuel de nos connaissances l'alimentation des niveaux profonds soit relativement faible et discontinue dans l'espace, nous remarquons qu'ils peuvent être intensifiés par l'exploitation.

Le développement de l'exploitation aura pour conséquence d'accroître la baisse du niveau de ces nappes, ce qui accroît les apports d'eau par percolation à partir des niveaux superficiels. Toutefois, les baisses très fortes pourront perturber le renouvellement de la ressource et induire un régime de déséquilibre.

Néanmoins, du fait de l'importance des eaux superficielles non régularisables en période humide, le risque d'épuisement à long terme des réservoirs souterrains ne doit pas susciter beaucoup d'inquiétude en raison de l'évolution des techniques et de l'économie des procédés de recharge artificielle. Ce processus (recharge artificielle) déjà employé en plusieurs pays (Californie, Israël, Maroc...) consiste selon **Mortier** et al (1971) à accroître artificiellement, par puits, bassins d'épandage, canaux d'infiltration, barrages fractionnés, etc..., le phénomène naturel de recharge des nappes à partir des eaux superficielles.

9.2.4. Conclusion.

Les aquifères du piémont sont les plus accessibles pour le développement de l'exploitation des eaux souterraines. Ils présentent des conditions pratiques et économiques d'exploitation villageoise plus favorables que celles qu'offrent les aquifères des Yaérés.

La particularité de ces derniers est liée d'une part, à la présence en surface d'eaux d'inondations qui empêchent l'accès à la région et d'autre part, à l'existance des niveaux aquifères profonds qui nécessitent des moyens d'exploitation onéreux et contraignants.

D'après le calcul des réserves, une augmentation massive des pompages est possible car, les prélèvements actuels ne représentent encore qu'une infime part des ressources.

En l'état actuel de l'exploitation, la mise en place d'un plan de gestion des ressources en eau du Grand Yaéré est difficile. Le pompage intense dans les niveaux profonds aura pour avantage l'apport de quelques précisions sur les termes du bilan des nappes.

Jusqu'à présent, certaines localités qui ne bénéficient pas d'ouvrages modernes continuent à se ravitailler à partir des points d'eau rudimentaires ou puisards qui présentent des risques de pollutions importants.

9.3. Vunérabilité des nappes à la pollution.

9.3.1. Introduction.

"Commun à tous les êtres vivants, l'eau, tout autant que l'air, est un bien vital : "l'eau c'est la vie" dit-on souvent, à juste titre. Que de problèmes si elle vient à manquer ou à être polluée! Quel spectacle donnerait une de nos grandes villes si elle était brusquement privée d'eau! On n'y songe guère, tant que l'eau est abondante et pure. Et la prise de conscience de ce qu'elle est un patrimoine, à gérer comme tel, est un phénomène récent, une idée qui commence à être perçue non plus seulement par les spécialistes, mais par chacun des utilisateurs (**Bodelle J. et Margat J.**, 1980)."

Dans la zone concernée par nos études, les caractéristiques physico-chimiques et chimiques des eaux souterraines sont bien centrées dans les normes de potabilité de l'O.M.S. Cependant, l'analyse des éléments majeurs tels que les sulfates, les chlorures, les nitrates et le potassium a montré que la présence de ces éléments, notamment les nitrates dans les eaux est liée à une pollution extérieure. Les teneurs en nitrates présentées dans le tableau 9.1 démontrent que les ouvrages situés sur le cordon sableux (Kourdaya, Kossa, Magdeme) sont très vunérables.

Tableau 9.1. Teneurs en nitrates des eaux de surface et des eaux souterraines de quelques ouvrages du Grand Yaéré.

Eaux de surface	mg/l	méq/l	Date
Motorsolo à Godola	43,10	0,69	26/07/86
Motorsolo à Fadaré	48,40	0,78	18/06/86
	44,00	0,71	10/07/86
Tsanaga à Bogo	44,00	0,71	16/06/86
	35,20	0,56	27/07/86
Retenue de Maga	44,00	0,71	23/07/86
	41,80	0,67	30/07/86
Eaux souterraines	**mg/l**	**méq/l**	**Date**
Alagarno	28,78	0,46	31/10/89
Ardori	26,04	0,42	07/10/90
Fadaré marché	34,72	0,56	02/10/90
Kourdaya	27,28	0,44	02/10/90
Kossa	166,30	2,68	28/10/89
	154,38	2,49	07/10/90
Magdeme	176,90	2,85	28/10/89
	152,52	2,46	07/10/90
Omaka	37,20	0,60	07/10/90

La connaissance des principes de fonctionnement des systèmes aquifères de cette région permet d'envisager les mesures préventives.

9.3.2. Eaux souterraines et pollution superficielle.

La connaissance de la vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis des contaminations de surface est très importante dans le cadre de la prévision des propagations des polluants à partir d'aménagement ou d'exploitation existants ou projetés (**Roux J. C.**, 1988).

Dans le Grand Yaéré, les sources de pollution sont très variables d'une localité à une autre. Dans l'ensemble, les pollutions agricoles et domestiques sont les plus fréquemment observées.

Plusieurs facteurs sont favorables à la pollution des eaux souterraines à partir de la surface. En effet, les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines sont importants car, les cours d'eau et les mares sont les sources de recharge prépondérantes des nappes. La profondeur de la nappe par rapport au sol étant faible, la nappe reste fragile face à toute introduction de polluants.

La région étant caractérisée par de faibles pentes, le coefficient de ruissellement est très faible et l'essentiel des eaux est intercepté par les sols et ne s'écoule pas en surface. Lorsqu'elles ne sont pas reprises par l'évaporation, elles s'infiltrent dans la nappe.

i) - <u>Pollutions agricole et pastorale</u>.

A la suite de la mise en service du barrage de retenue de Maga, le Grand Yaéré est devenu une région agricole. Les bien faits de ce barrage ont fait que la tendance actuelle vise à multiplier les projets de ce type dans toute la province. Les aménagements hydroagricoles ont pour conséquence :

l'amélioration des méthodes culturales (le retournement du sol et de la prairie entraîne une intense minéralisation), le développement de l'irrigation et des périmètres ou parcelles cultivables, l'utilisation des insecticides, des pesticides et des engrais organiques (l'emploi d'engrais chimiques est encore peu fréquent en raison de leur prix élevé)...

Tout en servant aussi de bêtes de trait et de transport, le bétail est utilisé pour la fertilisation des sols. Les bêtes à cornes jouent aussi un rôle important en agriculture, constituant la seule force motrice et de traction dont on dispose pour cultiver quelques hectares de terrain.

Les points d'abreuvage du bétail sont les mares, les cours d'eau et les points d'eau destinés à la consommation humaine (figure 9.1). Les endroits saisonnièrement trop humides servent généralement de pâturages permanents; ce qui signifie que c'est l'eau qui détermine la répartition des troupeaux. Pour l'ensemble de la région, les zones pastorales couvrent de grandes superficies. A ces superficies, il faut ajouter celles qu'occupent le Parc national de Waza qui représente l'une des plus importantes réserves du Cameroun.

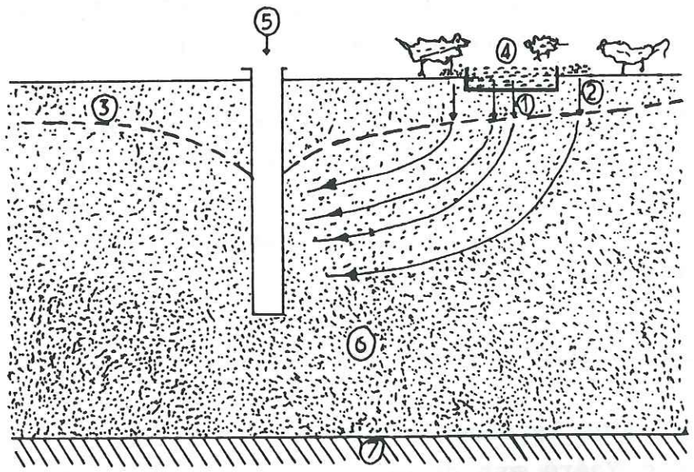


Figure 9.1. Pollution de la nappe par recyclage des eaux du bac d'abreuvage des animaux (**Ngounou Ngatcha B.**, 1993).
1 Pollution par fuite; **2** Pollution par infiltration à partir de la surface du sol; **3** Surface piézométrique; **4** Bac d'abreuvage; **5** Puits; **6** Aquifère; **7** Substratum imperméable.

L'influence des diverses techniques d'amélioration de l'élevage et de l'agriculture sur la composition chimique des eaux souterraines par l'importance de l'accumulation des nitrates dans les terres cultivées et autour des points d'eau implique une sérieuse menace pour les collectivités agricoles et pastorales qui dépendent surtout des puisards et des puits peu profonds.

ii) - <u>Pollutions urbaines et domestiques</u>.

Il ne nous est pas possible de passer en revue ici toutes les autres sources de pollution propres à chaque localité du Grand Yaéré. Mais, pour mieux situer le problème de la pollution, auquel la région est confrontée, nous allons prendre en exemple, la situation qui existe à Maroua. Celle-ci peut s'appliquer, à d'autres localités, mais le problème présente pour elles beaucoup de similitudes.

Maroua est le principal centre urbain du Grand Yaéré. La ville est bâtie sur la couverture même du système aquifère du piémont. Le principal cours d'eau temporaire du Grand Yaéré, le Mayo Tsanaga, que nous avons décrit dans le chapitre 2, traverse cette ville et de nombreux habitats aussi bien administratifs que collectifs sont construits sur les berges de ce cours d'eau (figure 9.2).

A Maroua, les eaux de ruissellement et les eaux domestiques ne sont raccordées à aucun réseau d'assainissement. Il n'existe également aucune station d'épuration, ni aucune décharge d'ordures ménagères contrôlée. Tous les déversements se font en directions des Mayos.

Le long des berges du Mayo Tsanaga, on trouve des dépôts d'ordures ménagères disséminés sans aucune précaution. Les eaux usées domestiques sont pour les habitats modernes, évacuées dans des puits perdus, à partir desquels elles peuvent gagner facilement la nappe (figure 9.3).

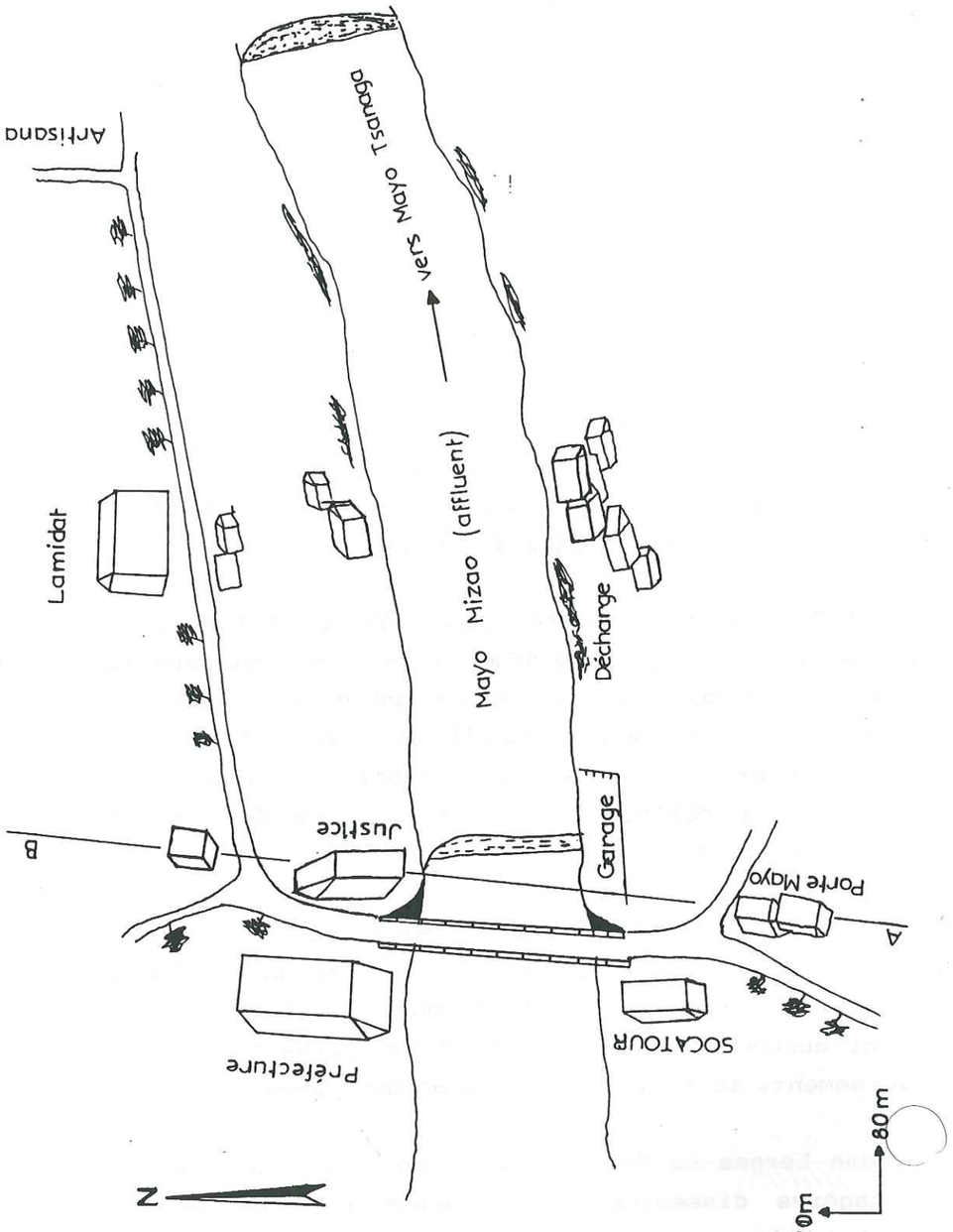


Figure 9.2. - Schéma de localisation des sources de pollution de la nappe sous-fluviale et la nappe du piémont dans le centre ville de Maroua (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

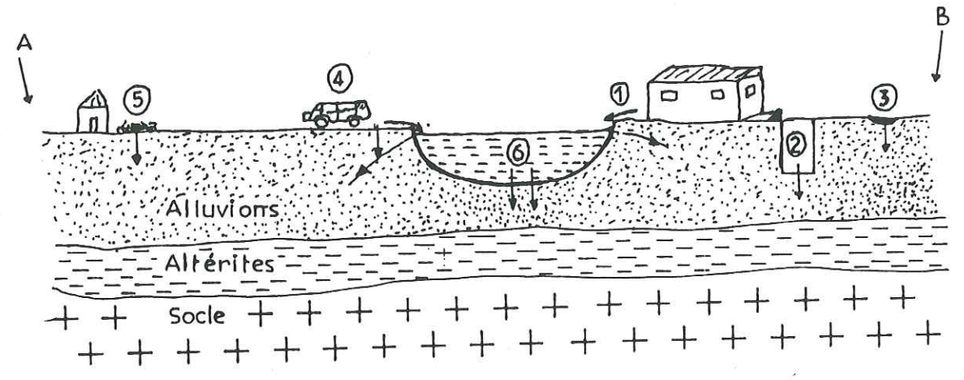


Figure 9.3. Schéma montrant le mouvement d'éléments polluants de la ville de Maroua vers la nappe sous-fluviale et la nappe du piémont (**Ngounou Ngatcha B.**, 1993)

1 Introduction directe dans le Mayo à partir des eaux de ruissellement; **2** Contamination de la nappe par la fosse septique; **3** Infiltration dans la nappe des eaux de la chaussée; **4** Ecoulement vers le Mayo et infiltration directe des huiles de garage; **5** Infiltration à partir des décharges domestiques; **6** Nappe sous-fluviale.

En bordure des Mayos, on trouve aussi des garages d'entretien de véhicules; les huiles usagées sont directement déversées dans les cours d'eau à partir de ces garages.

Sur les puits, la construction des margelles n'est pas suffisante; l'absence de dallage et les moyens d'exhaures (utilisation des seaux attelés à des cordes) actuels sont autant de sources de pollution.

Dans la région, le trafic anarchique des hydrocarbures qui a cours dans des conditions peu orthodoxes, est également une menace qui pèse sur la qualité des eaux.

Bien que nous n'en ayons pas fait mention, d'autres formes de pollution (rejets agro-industriels) peuvent aussi avoir une certaine importance, mais leur nombre est encore faible car, le tissu industriel est peu développé.

iii) - Nature des terrains et préservation de la qualité des eaux.

Malgré l'extrême diversité des sources de pollution dans la région, l'on serait tenté de se demander pourquoi la qualité des eaux n'est pas très compromise. L'une des raisons évidentes est que dans les circonstances actuelles, aucun contrôle de routine n'est pratiqué sur les différents ouvrages de la région. Il importe de signaler que des cas d'épidémie de choléra sont fréquents dans la région. En 1992, une épidémie de méningite a fait beaucoup de victimes. Nous nous demandons bien si ces cas d'épidémies ne sont pas liés à l'utilisation des eaux polluées. Malheureusement, nous ne disposons pas d'analyses bactériologiques et surtout des enquêtes épidemiologiques pour pouvoir statuer avec précision.

Selon **Bodelle** et **Tirat** (1979), il a été largement prouvé que le sol détruit la quasi totalité des micro-organismes pathogènes et provoque une rétention des substances chimiques, notamment par adsorption sur certaines argiles.

D'autre raisons peuvent être évoquées pour expliquer la préservation de la qualité des eaux. En effet, à Maroua en particulier, le champ de captage qui assure l'A.E.P. est situé en amont de la ville. Ainsi, les diverses formes de pollution qui ont lieu au centre de la ville n'auront plus de répercussions que dans les points d'eau des agglomérations situées en aval, mettant ainsi à posteriori les vrais pollueurs à l'abri. De plus, pendant les crues, les Mayos assurent certainement une forte dilution qui fait que les éléments dissous ne présentent pas de fortes teneurs.

En aval de Maroua, la demande en eau potable est encore très dispersée et peu importante sur l'ensemble de la région. Le fort pouvoir d'auto-épuration lié à la présence d'argiles dans les fonds des cours d'eau et dans les couches de terrains aquifères, font aussi que la qualité des eaux soit encore bonne.

Cependant, les fortes teneurs en nitrates des points d'eau situés sur le cordon sableux (Kourdaya, Magdeme) et dans les nappes perchées (Omaka) présentées dans le tableau 9.1 démontrent qu'en l'absence de couches d'argiles protectrices, les nappes sont très exposées à la pollution (figure 9.4). La teneur en tritium de 4,1 UT mesurée à Kourdaya prouve que cette pollution est actuelle.

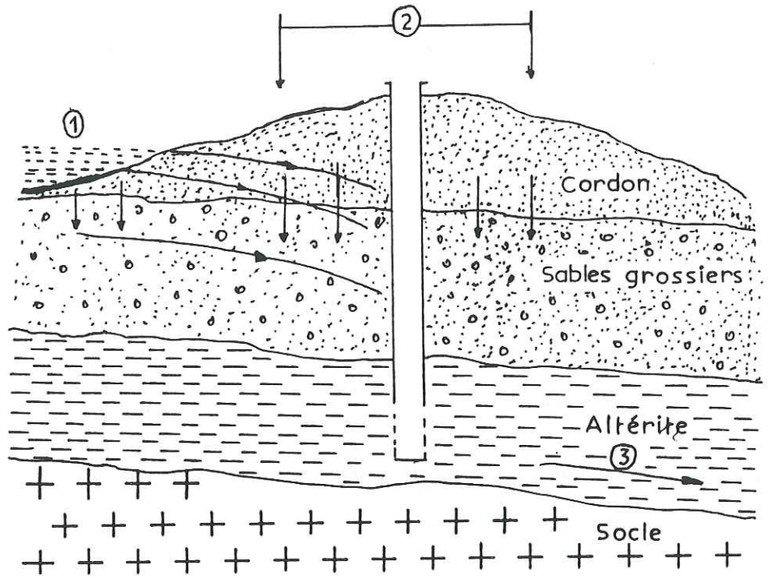


Figure 9.4. Schéma d'enrichissement en nitrates de la nappe à partir du cordon (**Ngounou Ngatcha B.**, 1993).
1 Lessivage par les eaux de ruissellement, des déchets bestiaux; 2 Lessivage direct par la pluie efficace; 3 Apport vers la nappe profonde des Yaérés.

Busse (1980) signale que des infiltrations polluantes de nature chronique (rejets d'eaux usées domestiques, effluents de stabulation ou de fumiers, etc) finissent toujours par atteindre la nappe malgré la présence d'écrans argileux, qu'ils traversent à la vitesse de déplacement maximale de 0,10 m/h.

La nature argileuse d'un terrain n'est donc pas un remède absolu à la contamination des eaux souterraines, ce n'est qu'un frein. Par ailleurs, en période d'étiage où les Mayos ne sont plus en eau, le processus de dilution n'est plus efficace. En cas d'un renforcement du champ de captage de la ville de Maroua ou en multipliant le nombre de points d'eau (les pompages intensifs peuvent engendrer localement des axes d'écoulement dans le sens nappe sous-fluviale/nappe souterraine) dans les centres ruraux, un éventuel accident causerait plus de dommages qu'il n'y paraît à première vue en raison du fort pouvoir transmissif de certaines portions de l'aquifère et des conditions thermiques favorables à la prolifération des bactéries.

9.3.3. Moyens de prévention et de protection des eaux souterraines contre la pollution.

Au Cameroun et dans beaucoup d'états d'Afrique, les utilisateurs des nappes souterraines se préoccupent très peu de leur état de santé.

Il importe de signaler que dépuis 1980, au delà de la seule contamination par les nitrates, le Land du Bade-Wurtemberg, en Allemagne, a dû, à lui seul, fermer 360 points de captage. En Alsace (France), la teneur moyenne de la nappe phréatique rhénane est passée de 13 à 24 mg/l en 10 ans, avec de grandes variations faisant apparaître des zones sensibles où la concentration dépasse localement 100 mg/l. Une étude de l'Agence de bassin Rhin-Meuse a montré que si l'augmentation de concentration dans la nappe phréatique rhénane devait se poursuivre à ce rythme, ce sont à long terme 1500 Km^2 de nappe sur 2800 au total qui seraient inutilisables; 100 Km^2 le sont d'ores et déjà du fait des seules teneurs excessives en nitrates. Ainsi, en Alsace, 48 % des captages existants et 317000 personnes seraient touchées.

A partir de ces exemples, l'on perçoit les difficultés techniques soulevés par la lutte contre la pollution, ainsi

que le coût très élevé d'une opération de décontamination. En effet, en France, les dépenses s'élèvent déjà à 1 milliard de francs (50 milliards de FCFA). En Allemagne, le coût d'une dénitrification à grande échelle est estimé à 1,4 milliards de marks (environ 225 milliards de FCFA) pour un an.

Compte tenu de ces faits, il est bien évident que "prévenir vaut mieux que guérir". C'est pourquoi, dans le Grand Yaéré où les nappes présentent une grande inertie (la lente évolution des polluants nécessiterait également un long délai de rétablissement en cas de détérioration de la qualité des eaux), il est important de se préparer suffisamment tôt à des actions préventives qui peuvent seules garantir la qualité des eaux souterraines à long terme. Il s'agit notamment :

- de prendre en compte le problème de pollution au niveau national. Par exemple, en France, il a été mis en place en 1984, par le Ministère de l'Environnement et de l'Agriculture, le CORPEN (Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates et les Phosphates d'origines agricoles) qui regroupe des scientifiques et des représentants de l'ensemble des usagers de l'eau. Jusqu'à nos jours, il n'existe au Cameroun aucune norme nationale de l'eau. La seule action de l'état s'exerce sur les contrôles effectués sur les eaux de rejets des établissements classés. Ceci se traduit au niveau du public qui occasionne souvent des pollutions en pure innocence, par une méconnaissance du problème de pollution. Nous espérons que la création récente d'un Ministère de l'Environnement changera les données du problème;

- de la mise en place de périmètres de protection autour des points d'eau actuellement exploités pour la distribution publique. La protection des zones de recharge potentielle avec une approche globale des problèmes, par bassin versant ou par bassin hydrogéologique. Dans le cas de Maroua, cela procède de la mise en place d'un plan d'assainissement ainsi que d'installations d'évacuation individuelles agréées, le tout

raccordé à des stations d'épuration. C'est sans conteste, la rapidité dans la mise en place de ces équipements qui sont cependant coûteux et délicats qui atténuéra la pollution des cours d'eau et des nappes. Jusqu'à présent, aucun aménagement (périmètre rapproché) n'est fait autour des points d'eau en vue de leur protection. Nous recommandons donc aux pouvoirs publics d'aider les collectivités locales à cloturer les points d'eau pour éloigner les animaux et empêcher le blanchissage. Le cas des points d'eau situés sur le cordon est un impératif;

- la solution provisoire et la plus durable est d'informer et de sensibiliser les utilisateurs de l'eau sur les dangers de la pollution et la nécessité de la prévention, de la protection de la qualité de l'eau et de l'amélioration de la sécurité d'approvisionnement. En effet, une bonne politique de l'eau ne pourra se concevoir ni s'appliquer sans la participation de tous les intéressés, c'est-à-dire de chacun; et pour la choisir en connaissance de cause, il faut être informé;

- de veiller à la régularité de l'irrigation, d'éviter la surfertilisation et les risques de fuites des nitrates. La première amélioration à apporter repose sur la prise en compte des potentiels de minéralisation du sol;

- de la mise en place dans la province d'une structure d'analyse chimique et bactériologique des eaux. Cette structure se révelerait d'une grande utilité car, elle faciliterait le suivi régulier de la qualité des eaux et par conséquent, le contrôle et la mise en place d'une action rapide contre une éventuelle pollution extérieure ou une dégradation des pompes ou des ouvrages de captage;

- de l'amélioration des modes d'abreuvement du bétail par la réalisation des points d'eau spécifiquement pastoraux. Tous les points d'eau que nous avons inventorié sont destinés à l'hydraulique villageoise. A l'exception du Parc national de

Waza, aucun ouvrage n'a été exécuté pour l'hydraulique pastorale. Dans de nombreuses localités, plusieurs points d'eau servent en même temps les besoins des populations et ceux du bétail. Dans les niveaux aquifères peu profonds, on peut envisager la construction de puits-citernes. Il s'agit de puits modernes d'environ deux mètres de diamètre qui vont favoriser le stockage d'une réserve d'eau considérable. Ce type d'ouvrage qui pose moins de problèmes d'entretien, permettra d'éloigner les animaux des points d'eau AEP;

- de la mise en place dans les carrés agricoles d'une part, de piézomètres pour le contrôle des transferts sol-nappe et de la qualité des eaux et d'autre part de lysimètres qui devraient permettre de mieux comprendre le fonctionnement du sol, et de quantifier de façon précise les flux et les bilans eau, azotes, pesticides. Ceci dans le but d'élaborer un modèle pouvant être utilisé comme outil d'optimisation sur les méthodes et les doses d'apport d'eau, d'engrais et de pesticides;

9.3.4. Conclusion.

Les systèmes aquifères du Quaternaire qui sont les plus favorables pour le développement de l'exploitation des eaux souterraines, sont par conséquent très vulnérables à la pollution.

Le but de ce sous-chapitre était de passer en revue les principales sources de pollutions des eaux et d'ébaucher une stratégie de recherche régionale portant sur l'amélioration de la qualité des eaux, et de la qualité des sols dans les secteurs d'exploitations hydroagricole et hydropastorale.

En somme, bien des questions qui sont autant des thèmes de recherches sont mis en relief. Par exemple, la cartographie des principales zones de pollution qui permettrait de faire face à une situation qui risque de s'aggraver en évoluant.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.

i) - Conclusions générales.

Dans le Grand Yaéré, la connaissance hydrogéologique des aquifères est rendue assez complexe par l'existence de nombreux changements de lithologie des terrains et par des variations régulières de la puissance des couches. Un des objectifs de ce travail a été de redéfinir les ensembles géologiques constituant les aquifères à l'aide des corrélations entre les logs de forages, et ensuite par des cartes de variabilité spatiale des paramètres géologiques et hydrogéologiques.

La division stratigraphique du Cénozoïque adoptée par les travaux antérieurs n'est pas représentative des systèmes aquifères. Notre étude démontre que les sables de base du Pliocène inférieur ne sont pas séparables des sables et argiles de l'Oligo-Miocène. Ainsi, dans le Grand Yaéré, les dépôts Oligo-Mio-Pliocènes désignent désormais un seul et même système multicouche : **le système aquifère du Continental terminal.**

La mise en évidence dans la plaine des Yaérés d'une couche d'argile compacte séparant deux couches (superficielle et profonde) démontre que les zones aquifères ne correspondent pas à une seule couche géologique mais à un système bicouche dont l'importance aquifère est extrêmement variable. La localisation des eaux bicarbonatées sodiques à teneurs en tritium très faibles dans les niveaux aquifères profonds a permis de confirmer et de compléter cette identification.

La bordure aval du cordon sableux Limani-Yagoua est matérialisée sur le plan hydrodynamique par un axe de drainage des eaux souterraines en provenance de la plaine des Yaérés et de la plaine du piémont. Cet axe délimite dans les terrains du Quaternaire, deux systèmes aquifères : **le système aquifère du**

piémont et le système aquifère alluvionnaire du Quaternaire des Yaérés.

Dans le piémont, **l'alimentaion des nappes à partir des précipitations est confirmée par les isotopes :** la relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines donne une droite, $\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H = 7,89*\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O + 7,10$, parallèle à la droite météorique mondiale. La relation nappe/rivière ainsi que l'analyse des conductivités et des teneurs en tritium des eaux dans le secteur de Bogo (piémont) ont démontré que **l'apport à la nappe est également assuré par les cours d'eau.**

Dans la plaine des Yaérés, la relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines montre qu'**à l'exception des nappes perchées, la recharge des nappes souterraines ne se fait pas par infiltration directe des précipitations. L'alimentation des nappes superficielles à partir des eaux des mares** (ce qui n'était pas admis jusqu'ici) **est confirmée :** par la carte piézométrique d'une part, par la présence dans les alluvions sous-jacentes d'eaux à faciès chimique particulier; bicarbonaté calcique, magnésien et sodique d'autre part, et enfin par le caractère variable des teneurs en oxygène-18 des eaux des forages de Tchédé et de Diéguéré en fonction du temps (variations qu'on n'observe pas dans les eaux souterraines du piémont ainsi que celles des nappes perchées et des niveaux aquifères profonds des Yaérés). Dans ces conditions, il se pose le **problème de la capacité d'infiltration des argiles de surface.**

Les teneurs en isotopes lourds des eaux des nappes profondes des Yaérés suggèrent une alimentation à partir des eaux du système aquifère du piémont, ce qui suppose un drainage à partir du cordon sableux et par un réseau de failles profondes issu de la structure en gradin du socle. Le débit spécifique de l'ordre de 3 $m^3/h/m$ et une transmissivité proche de 10^{-3} m^2/s mesurés à Alagarno traduisent une bonne capacité de production des aquifères profonds. Leur exutoire

est dirigé vers le Nigéria où ils sont captés par des forages artésiens.

Les eaux bicarbonatées calciques des niveaux aquifères superficiels du piémont et des Yaérés, ont des teneurs en tritium correspondant à des eaux actuelles (^{3}H > 4 UT), tandis que les eaux bicarbonatées sodiques qui caractérisent les niveaux aquifères profonds des Yaérés et les eaux des forages profonds dans les altérites du piémont (les niveaux altérés subaffleurants des zones d'alimentation indiquant des eaux riches en tritium), suggèrent une origine moins récente (^{3}H < 4 UT).

Le fait que le cordon sableux Limani-Yagoua (actuellement considéré comme la limite d'un ancien lac holocène), **comme son prolongement au Niger (cordon de Tal) longe une zone d'accident est-il une simple coïncidence de direction, ou s'agit-il d'un contrôle par des mouvements tectoniques très récents?** Nous avons récensé quelques indices qui témoignent de l'existence d'une néo-tectonique. L'absence de datations géochronologiques des formations géologiques et des accidents montre que le problème des cordons sableux mérite des études complémentaires. Toutefois, il est déjà intéressant de savoir que : **cette formation jadis considérée comme stérile, ne constitue ni une barrière hydraulique, ni une nappe stricto sensu; elle joue un rôle hydrogéologique important.** En raison de sa faible porosité utile (specific yield) qui s'accompagne d'importants transferts d'eau par drainage dans les niveaux profonds, elle constitue pour les nappes sous-jacentes, le premier réservoir interceptant les eaux d'infiltration générées par les pluies et le ruissellement. **La bonne infiltrabilité du cordon sableux est démontrée par les fortes teneurs en nitrates** rencontrées dans les ouvrages de captage de Kourdaya (27,28 mg/l), Kossa (166,30 mg/l) et de Magdeme (176,90 mg/l), ainsi que par la teneur en tritium de 4,1 UT de l'eau prélevée à Kourdaya.

En ce qui concerne les anomalies piézométriques ou "nappes en creux" situées en aval du cordon sableux limani-Yagoua, les coupes géologiques montrent que la représentation des cartes piézométriques disponibles a été faussée par l'utilisation de points d'eau captant tantôt les aquifères superficiels, tantôt les aquifères profonds. Ces deux niveaux aquifères sont caractérisés par des faciès chimiques différents d'une part (bicarbonatés calcique en surface et sodique en profondeur), par des droites de corrélation $^{18}O/^{2}H$ différentes d'autre part (eaux évaporées en surface à teneurs en tritium indiquant une origine récente et eaux non évaporées en profondeur peu tritiées d'origine ancienne). Par ailleurs, l'étude de la relation entre la teneur en oxygène-18 et les niveaux statiques - confortée par la droite de relation $^{18}O/^{2}H$ des eaux profondes ($\delta^{o}/_{oo}{}^{2}H = 7,75*\delta^{o}/_{oo}{}^{18}O + 3,59$) - montre clairement que contrairement à ce qui a été admis par les auteurs anciens pour expliquer les "anomalies piézométriques" dans le Grand Yaéré, **l'évaporation n'affecte pas les niveaux aquifères profonds dans cette région.**

L'estimation des ressources régulatrices et des réserves permanentes indique que l'on a très souvent sous-estimé l'importance des aquifères. Dans le contexte actuel, **les problèmes d'eaux dans le Grand Yaéré sont plus des problèmes de maîtrise de l'implantation des ouvrages de captage que des problèmes de gestion.**

Le choix du type d'exploitation dépend non seulement de la **nature des besoins**, mais également du **type de ressources. Les aquifères superficiels constituent les nappes les mieux adaptées à l'hydraulique villageoise : l'eau est accessible et les investissements que leur exploitation nécessite sont facilement supportables.** Dans le secteur de Waza à niveaux aquifères superficiels inexistants ou peu importants, **les nappes perchées ont un caractère exceptionnel;** elles permettent de se passer temporairement des niveaux aquifères profonds qui nécessitent des moyens d'exploitation onéreux et contraignants.

Le problème de développement de l'exploitation des nappes profondes est moins de créer de nombreux forages à pompes manuelles peu rentables, que de concevoir un équipement susceptible de fournir de gros débits. La conception des exploitations intensives des aquifères profonds peut être en effet considérée comme un investissement à caractère économique (même s'il s'agit de secteurs peu peuplés et d'activité très réduite), faute de ressources aquifères superficielles suffisantes et de bonne qualité.

A la suite d'un bilan des différentes sources de pollution qu'on rencontre dans la région, il apparaît que **le cordon sableux qui ne bénéficie pas d'une protection par les "argiles de surface", est le domaine le plus vulnérable à la pollution.** Nul doute que l'absence de **périmètre de protection** autour des axes de recharges, et des points d'eau situés sur cette formation, risque d'être à court terme, préjudiciable pour l'ensemble de la nappe.

ii) - <u>Recommandations</u>.

Notre travail qui doit être perçu comme une contribution à la connaissance des ressources en eaux ne met pas un terme au "projet Grand Yaéré". Tout en proposant des solutions, nous avons mis en évidence un certain nombre de problèmes qui méritent d'être précisés.

Si l'ampleur des programmes d'hydraulique est largement justifié du fait des besoins en eaux croissants des populations rurales, **l'équipement des ouvrages (puits et forages) doit être précédé d'une analyse approfondie de leurs rendements à moyen et à long terme.** Le forage étant la seule source de données hydrogéologiques importantes dans la région, on doit également exiger des campagnes d'hydraulique prochaines, au moins un pompage d'essai de **longue durée** par rayon du Km^2. En effet, le coût d'un forage et sa durée

d'amortissement sont tels qu'aucun risque, aucune économie non justifiée ne doivent être tolérés.

La recherche et **la cartographie des principales zones de pollution** qui risquent de modifier de façon grave et permanente la qualité des eaux **dans la ville de Maroua** est indispensable pour assurer la protection des nappes. D'ores et déjà, s'imposent par souci d'hygiène et de la santé publique, un plan d'assainissement de la ville et des **analyses physico-chimiques et bactériologiques systématiques** des eaux.

La maîtrise du bilan des nappes souterraines exige une connaissance complémentaire des paramètres hydrauliques. Il s'agit notamment : de l'étude du **transfert d'eau** à travers le cordon sableux et les zones d'eau stagnante, des données sur la **géométrie des aquifères profonds**, ainsi que la mise en place d'un **réseau de piézomètres d'observation** et de son **suivi régulier en hautes eaux et en basses eaux.**

BIBLIOGRAPHIE.

BIBLIOGRAPHIE.

ABUSADA S. M., 1980 - Quelques problèmes du gisement et de l'exploitation des eaux souterraines en zone aride : Koweit (Arabie Nord-Est). Thèse Doct. 3e cycle, Univ. Grenoble.

A.I.E.A., 1976 - Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. Proceedings of an advisory group meeting. Vienna 27-31, january 1975.

A.I.E.A., 1981 - Statistical treatment of environmental isotope data in precipitations. Technical reports, n° 206.

A.I.E.A., 1981 - Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Technical reports, n° 210.

ALBINET M., 1965 - La pollution des eaux souterraines. Bull. BRGM n°6, pp 7 à 32.

Anonyme - Carte du Cameroun à l'échelle 1/200000e.
- Feuille Maroua NC - 33 - XV
- Feuille Mora NB - 33 - XXI
- Feuille Yagoua NC - 33 - XVI
- Feuille Mokolo NC - 33 - XIV
- Feuille Koussérie ND - 33 - III

ARANYOSSY J. F., 1989 - Quelques exemples pratiques d'application des isotopes de l'environnement aux études hydrogéologiques. Bull. hydrogéologie, n°3, pp 159-166, 5 fig., 1 tabl.

ARANYOSSY J. F.,1990 - L'apport des techniques isotopiques à l'étude de la recharge des aquifères sous contraintes techniques et climatiques extrêmes. Diplôme d'Habilitation, Univ. de Paris-Sud Centre Orsay.

ARANYOSSY J. F. et **GAYE C. B., 1992** - La recherche du pic de tritium thermonucléaire en zone non saturée profonde sous climat semi-aride pour la mesure de la recharge des nappes : première application au Sahel. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 315, série II, pp 637-643.

ARANYOSSY J. F.; GUERE A. et **SIDORO M., 1989** - Etude par les isotopes de l'environnement des dépressions piézométriques; premières données sur des exemples au Mali. Bull. Hydrogéologie, n°3 pp 151-158, 5 fig., 2 tabl.

ARCHAMBAULT J., 1960 - Les eaux souterraines d'Afrique Occidentale. Ed. Berger Levrault, Nancy, 139 p.

ARCHAMBAULT J., 1987 - Réflexions sur l'alimentation et l'évaporation des nappes phréatiques en Afrique subsaharienne. Bull. hydrogéologie, n°2, PP 69-78, 8 fig.

ARLAB/GEOLAB 1984; 1985; 1986; 1987, - Programme d'urgence d'hydraulique villageoise dans les provinces du Nord, de l'Extrême-Nord et de l'Adamaoua. Phases I, II et III - Rapport final, 19 tomes, MINEE, MINAGRI, FONADER.

BARBEAU J., 1956 - Notice explicative sur la feuille Fort-Lamy. 34 p + carte géologique de reconnaissance à l'échelle 1/1000000e.

BENECH V.; QUENSIERE J.; VIDY G., 1982 - Hydrologie et physico-chimie des eaux de la plaine d'inondation du Nord Cameroun. Cah. ORSTOM, série hydrologie, vol. XIX, n°1, Paris, pp 15-36.

BIEMI J., 1992 - Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotope des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse Doc. ès Sciences, Univ. Nationale de Côte d'Ivoire, 493 P.

BISCALDI R., 1970 - Hydrogéologie de la nappe phréatique du Logone-Chari-Tchad. Rapport de fin de mission (1967-1969). BRGM 70.YAO.003 + Annexes.

BLAVOUX B., 1978 - Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse Doct. ès Sciences, Univ. Paris VI, 333 p.

BLAVOUX B. et MUDRY J., 1990 - Les teneurs en oxygène-18 en fonction de l'altitude des impluviums des réservoirs karstiques du Jura et du Vaucluse. Mémoire of the 22nd Congress of IAH, vol. XXII, Lausanne.

BLAVOUX B.; MUDRY J. et PUIG J. M., 1993 - Bilan, fonctionnement et protection du système karstique de la fontaine de Vaucluse (Sud-Est de la France). Geodinamica Acta (Paris) 1991/1992, 5, 3, 153-172.

BODELLE J. et MARGAT J., 1980 - L'eau souterraine en France. Masson, Paris-New York-Barcelone-Milan, 208 p.

BODELLE J. et TIRAT M., 1979 - Utilisation des eaux souterraines en France. Bull. du BRGM, (2e série), section III, n° 4, pp 415 à 437, 5 fig., 15 tabl.

BROCHET P. et GERBIER N., 1974 - L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique. Evaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie n°65 de la météorologie nationale, Paris.

BUSSE J. F., 1980 - La pollution dans la nappe des formations quaternaires de l'Est de LYON (France). Thèse Doct. ès Sciences Naturelles, USM de Grenoble 1, 487 p.

CASTANY G., 1979 - Ressources en eau souterraine de la France. Bull BRGM, (2), III, n°4, pp 401 à 414, 4 fig., 4 tabl.

CHOURET A.; MATHIEU P. et FONTES J. Ch., 1977 - La nappe phréatique à la périphérie du lac Tchad. Rapport interne ORSTOM.

COLLIN J. J., 1979 - Les eaux souterraines de la plaine saône-doubs (gisement, hydrodynamique, hydrochimie, pollution, gestion et sauvegarde). Thèse Doct. ès-sciences, Univer. Claude Bernard-Lyon (1976), Document du BRGM, n° 9, 318 p + annexe.

DETAY Michel, 1987 - Identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non numériques et modélisation de la connaissance en hydrogéologie sub-sahélienne. Application au Nord Cameroun. Thèse de Doctorat ès-sciences, Université de Nice, 456 p.

DIENG B., 1987 - Paléohydrogéologie et hydrologie quantitatives du bassin sédimentaire du Sénégal. Essai d'explication des anomalies piézométriques observées. Thèse de Doctorat ENSM Paris, 172 p + annexes.

DJEUDA TCHAPGA H. B., 1987 - Géologie et hydrogéologie d'un secteur de la zone mobile d'Afrique centrale : Région de Poli. Nord Cameroun. Thèse Doct. Univ. Grenoble 1, 332 p.

DJEMAI M., 1985 - Hydrologie du bassin versant du Haut Sebaou. Hydrogéologie des formations alluviales (Algérie). Thèse Doct-Ing., USM de Grenoble 1, 261 p.

DMG, 1970 - Carte hydrogéologique Maroua Fort-Foureau. Echelle 1/500000. République fédérale du cameroun.

DNHE/PNUD, 1990 - Synthèse hydrogéologique du Mali. Projet DTCD/MLI/84/005.

DUMORT J. C. et PERONNE Y., 1966 - Notice explicative sur la feuille Maroua. 50 p. En annexe carte géologique de reconnaissance de la république fédérale du Cameroun, échelle 1/500000e.

DURAND A. et LANG J., 1986 - Approche critique des méthodes de reconstitution paléoclimatique : le Sahel nigero-tchadien depuis 40000 ans. Bull. Soc. Géol. France, 2(2), pp 267-278.

DURAND A. et MATHIEU P., 1979-1980 - Le Quaternaire supérieur sur la rive sud du lac Tchad. Cah. ORSTOM, série géol., vol. XI, n°2, PP 189-203.

DURAND A. et MATHIEU P., 1980 - Evolution paléogéographique et paléoclimatique du bassin tchadien au Pléistocène supérieur. Revue de géologie dynamique et de géographie physique. Vol. 22, Fasc. 4-5, PP 329-341, Paris.

EKODECK G. E., 1976 - Contribution à l'étude de la nature et du comportement géotechnique des dépôts superficiels gonflants du Nord Cameroun. Thèse Doc. 3eC Univ. de Grenoble 1, 181 p.

ENGALENC M., 1979 - L'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Série Hydrogéologie CIEH, 2 volumes.

EMSELLEM Y. et MARGAT J., 1971 - Collecte et stockage des informations sur les caractéristiques hydrodynamiques des réservoirs aquifères et l'état des réserves d'eau souterraines. Bull. BRGM, (2), III, 3, pp 3-10, 1 fig.

FAO/UNDP/CBLT, 1974 - Etude des ressources en eau du bassin du lac Tchad en vue d'un programme de développement : perspectives et développement agricole.

FAURE H.; FONTES J. Ch.; GISCHLER C. E.; MOOK W. G. et VOGEL J.C., 1970 - Un exemple d'étude d'hydrogéologie isotopique en pays semi-aride, le bassin du lac Tchad. Journal of hydrology, n° 10, pp 141-150.

FONTES J. Ch., 1976 - Isotopes du milieu et cycles des eaux souterraines : quelques aspects. Thèse Doct. ès Sciences, Univ. Paris VI, 208 p.

FONTES J. Ch.; BORTOLAMI G. C. et ZUPPI G. M., 1978 - Hydrologie isotopique du massif du Mont-Blanc. IAEA-SM-228/22, "Isotope hydrogy, 1978" vol. 1.

FONTES J. Ch.; MAGLIONE G. et ROCHE M. A., 1970 - Eléments d'hydrologie isotopique dans le bassin du lac Tchad. "Peaceful uses of atomic energy in Africa" IAEA.

FORACO, 1987 - Alimentation en eau de la réserve de Waza par forage. Rapport étude et forage, Ministère du Tourisme, Yaoundé.

GAC J. Y., 1980 - Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n°123, 251 p.

GASPARINI A.; CUSTODIO E.; FONTES J. Ch.; JIMENEZ J. et ANTONIO NUNEZ J., 1990 - Exemple d'étude géochimique et isotopique de circulation aquifères en terrain volcanique sous climat semi-aride (Amurga, Gran Canaria, Iles Canaries). Journal of hydrology, n° 114, pp 61-91.

GAZEL J.; HOURRCQ V.; NICKLIS M., 1956 - Notice explicative de la carte géologique du Cameroun au 1/1000000e. Bull. Dir. Mines et Géologie, n°2, 62 p.

GHOGOMU R.; MOREAU C.; BROWN W. L. and ROCCI G., 1989 - THe Ntumbaw complex, NW Cameroon : an atypical anogenic ring complex of intermediate composition. Journal of African Earth Sciences, vol. 8, n° 1, pp 1-9.

GUIRAUD R., 1988 - L'hydrogéologie d'Afrique. Journal of African Earth Sciences, vol. 7, n° 3, pp 519-543.

HEM J. D., 1985 - Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Third edition. Geological Survey Water Supply Paper 2254. U. S. Government printing office, Washington : 1970. 363 p.

IGCP-IUGS, 1980 - Continental Terminal of Africa. Proceedings of the International Geological Correlation Project. n° 127.

JACQUEMIN H., 1981 - Contribution à l'étude géochimique des éléments en trace à la pétrogenèse des complexes anorogéniques (Nord Cameroun). Thèse 3e cycle, Nancy I, 197 p.

JOSEPH A. et ARANYOSSY J. F., 1989 - Mise en évidence d'un gradient de continentalité inverse en Afrique de l'Ouest en relation avec les lignes de grains. Bull. Hydrogéologie, n°3, pp 215-218.

KILIAN C., 1931 - Des principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Somm. Soc. Géol. France, 9, 109-111.

KOCH P., 1959a - Carte géologique de reconnaissance du Cameroun à l'échelle du 1/500000e, coupure Garoua Ouest avec notice explicative, 48 p, DMG, Cameroun.

KOGBE C. A. and BUROLLET P. F., 1990 - A review of continental sediments in Africa. Journal of African Earth Sciences, vol. 10, n° 1/2, pp 1-25.

LAIGLE D., 1991 - Une application de la modélisation mathématique et de l'optimisation de paramètres à la dynamique de l'eau et des nitrates dans un sol agricole. Interprétation et simulation des mesures "in situ" en plaine d'Alsace. Thèse Doct. Univ. Louis Pasteur Strasbourg, 227 p.

LANG J.; KOGBE C.; ALIDOU S.; ALZOUMA A.; BELLION G.; DUBOIS D.; DURAND A.; GUIRAUD R.; HOUESSOU I.; DE KLASZ I.; ROMANN E.; SALARD-CHEBOLDAEFF and TRICHET J., 1990 - The Continental Terminal in West Africa. Journal of African Earth Sciences, vol. 10, n° 1/2, pp 79-99.

LASSERRE M., 1967 - Données géochronologiques nouvelles acquises au 1er janvier 1967 par la méthode au Strontium appliquée aux formations cristallines et cristallophylliennes du Cameroun. Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont Ferrand, 1967, n° 36, Géol. Min, n° 16, pp 109-144.

LELONG F. et LEMOINE J., 1968 - Les nappes phréatiques des arènes et des altérations argileuses. Leur importance en zone tropicale. Les difficultés de leur exploitation. Bull. BRGM, 2e série, section III, n°2.

LE MARECHAL A., 1976 - Géologie et géochimie des sources thermominérales du Cameroun. Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 59, Paris.

LEFEVRE R., 1971 - Mesures de l'inféro-flux du Mayo Tsanaga. ORSTOM Yaoundé.

LEMOINE J., 1978 - L'équipement des villages en puits et forages en fonction des conditions hydrogéologiques dans les états A.C.P. d'Afrique. BURGEAP/CCE, R.267-E.613, 177 p.

LOUIS P., 1970 - Contribution géophysique à la connaissance géologique du bassin du lac Tchad. Mémoire ORSTOM, n°42.

MAGLIONE G., 1976 - Géochimie des évaporites et silicates néoformés en milieu continental confiné. Les dépressions interdunaires du Tchad. Travaux et Doc. de l'ORSTOM, n° 50.

MALOU R.; MUDRY J. et **SAOS J. L.**, 1991 - Recharge pluviale de l'aquifère superficiel de la vallée de Baïla (Basse Casamance, Sénégal). Bull. Hydrogéologie, n° 2, pp. 107-116, 8 fig., 1 tabl.

MBONU M., 1991 - Hydrogéologie, Hydrochimie et Géochimie Isotopique des aquifères de socle du Plateau de Jos et des plaines envirinnantes (Nigéria). Thèse Doct. Univ. d'Avignon, 171 p.

MEGNIEN C., 1979 - Hydrogéologie du Centre du bassin de Paris. Thèse de Doct. ès-sciences, Univer. Paris VI (1976), Mémoire du BRGM, n° 98.

MORTIER F.; NGUYEN QUANG TRAC; TRIGUEROS E., 1971 - Etude et utilisation des eaux souterraines pour la mise en valeur agricole. Exemple du bassin du Guadalquivir (Espagne). Bull. BRGM, (2), III, 3, pp 27-41, 4 fig., 1 tabl.

MOSER H.; WOLF M.; FRITZ P.; FONTES J. Ch.; FLORKOWSKI T. et **PAYNE B. R., 1989** - Deuterium, oxygen-18, and tritium in stripa groundwater. Geochemica and cosmochimica acta, Vol. 53, pp 1757-1763.

NAAH E., 1990 - Hydrologie du Grand Yaéré du Nord Cameroun. Thèse Doc. d'état, Univ. de Yaoundé, 327 p.

NDIAYE B.; ARANYOSSY J. F.; DIENG B. et **FAYE A., 1991** - Le rôle de l'évapotranspiration dans la formation des dépressions piézométriques; hypothèses et modélisation.

NDIAYE B.; ARANYOSSY J. F.; NGOUNOU NGATCHA B.; BA M.; NAAH E., (en préparation) - Etude par modèle mathématique de l'action de l'évapotranspiration dans la formation des "nappes en creux".

NGOUNOU NGATCHA B., 1990 - Etude hydrogéologique du Grand Yaéré du Nord Cameroun. Géologie-Hydrodynamique-Hydrochimie. Mémoire DEA univ. de Dakar et rapport Projet Régional RAF/8/012, 105 p.

NGOUNOU NGATCHA B., 1992 - Initiation à la géostatistique et à la modélisation numérique. Rapport de stage, "Projet Grand Yaéré" IST/IRGM/CRDI, 64 p.

OLIVRY J. C., 1986 - Fleuves et rivières du cameroun. Collection "Monographies hydrologiques ORSTOM", n°9, Paris, 733 p + 2 cartes hors texte.

ONUGBA A., 1990 - Contribution à la connaissance des systèmes aquifères de la Haute Benoué. Etude hydrochimique et isotopique de zones témoins du socle sédimentaire. Vulnérabilité des forages à la pollution. Thèse de Doctorat Univ. d'Avignon, 203 p + annexes.

OUSMANE B.; FONTES J. Ch.; ARANYOSSY J. F. et **JOSEPH A., 1983** - Hydrologie isotopique et hydrochimie des aquifères discontinus de la bande sahélienne et de l'Aïr (Niger). IAEA-SM-270/59, "Isotope hydrology, 1983".

PIAS J., 1962 - Les sols du moyen et bas Logone, du bas Chari, des régions riveraines du Lac Tchad et du Bahr El Ghazal. ORSTOM, Paris.

PIAS J., 1970 - Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent. Mémoire ORSTOM, n°43, 407 p + planches + 2 cartes hors texte.

PILOT J., 1974 - Les isotopes en géologie (méthodes et applications). Adapté de l'allemand par Réné Letolle. Doin, Editeurs, S. A. 176 p.

PLOTNIKOV N. A., 1962 - Ressources en eaux souterraines : classification et méthodes d'évaluation. Traduit sous l'égide de l'UNESCO par Madame **M. LARONDE**, Gauthier-Villars et C^{ie}, Paris VI.

POUCLET A. et **DURAND A., 1983** - Structures cassantes cénozoïques d'après les phénomènes volcaniques et néotectoniques au Nord-Ouest du lac Tchad (Niger Oriental). Extrait des Annales de la société géologique du Nord. T. C.III, pp 143-154.

RODIER J., 1984 - L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 7^{e} édition, Dunod, 1365 p.

ROUX J. C., 1988 - Contrôle et protection de la qualité des eaux souterraines. Bull. hydrogéologie, n° 1, pp 5-33.

SARROT-REYNAULD J. et **TRAORE A. Z., 1989** - Etude isotopique des eaux souterraines de la région de Koula Nossombougou (Mali). Bull. Hydrogéologie, n° 3, pp 179-187.

SAUVAGE J. F. et **SAUVAGE M., 1992** - Tectonique, néotectonique et phénomènes ignés à l'extrémité est du fossé de NARA (Mali) : Daounas et lac Faguibine. Journal of African Earth Sciences, vol. 15, n° 1, pp 11-33.

SAVADOGO A. N., 1984 - Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse Doc. ès Sciences, Université S.M. de Grenoble 1, 351 p.

SCHNEIDER J. L., 1970 - Notice explicative de la carte hydrogéologique au 1/500000e de la République du Tchad. Rapport BRGM 70 RME 029.

SCHOELLER H., 1962 - Les eaux souterraines. Ed. Masson, Paris.

SCHWOERER P.; DASSIBAT C.; RISTER J. J., 1965 - Hydrogéologie du Nord Cameroun. Rapport final de la mission de recherches hydrogéologiques. DMG/BRGM, YAO.65.A13, 117 p.

SEINY-BOUKAR L., 1990 - Regime hydrique et dégradation des sols dans le Nord-Cameroun. Thèse Doct. 3e cycle, Univ. Yaoundé.

SERVANT M., 1983 - Séquences continentales et variations climatiques : évolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. Travaux et documents de l'ORSTOM, n°159, 573 p.

SERVANT-VILDARY S., 1978 - Etude des diatomées et paléolimnologie du bassin tchadien au Cénozoïque supérieur. Tome 1. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n°84.

SIGG L.; STUM W. et BEHRA Ph., 1992 - Chimie des milieux aquatiques. Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. Masson, Paris-Milan-Barcelone-Bonn.

SOGREAH, 1979 - Données numériques sur les eaux souterraines et de surface de la zone du projet SEMRY II. Rapport SOGREAH 32 0458 R10.

SOGREAH/GEOLAB, 1991 - Supervision d'un projet d'hydraulique villageoise dans les provinces du Nord et de l'Extrême-Nord. Projet BID 300 forages. Rapport de fin de projet campagne 89/90 et 90/91, 9 volumes.

TCHOUA F., 1976 - A propos de la note de J. Gouhier, J et D. Nougier intitulée : "Contribution à l'étude volcanologique du Cameroun, ligne du Cameroun-Adamaoua". Ann. de la Fac. des Scie. du Cameroun, n°21-22, pp 47-88.

TILLEMENT B., 1970 - Hydrogéologie du Nord cameroun. Bull de la DMG, n°6, Yaoundé.

URBAPLAN, 1987;1990 - Projet d'aménagements hydroagricoles dans la zone du Mayo Tsanaga (Province de l'Extrême-Nord).

WAKPONOU A., 1988 - Etude géomorphologique des formations superficielles dans la région du Diamaré : l'assise argileuse de Doyang et le cordon sableux Limani-Yagoua. Mém. Maîtrise, Univ. de Yaoundé, 150 p.

ANNEXES

Annexe 1. Planche A. Situation des axes de coupe des figures 3.4, 7.1, 7.2, 7.3,

Annexe 2. Caractéristiques géométriques et hydrauliques des ouvrages de captage.

Annexe 3. Paramètres physico-chimiques, diagrammes d'analyses chimiques et histogrammes de distribution des teneurs en anions et cations.

Annexe 4. Résultats d'analyses isotopiques des eaux souterraines du Grand Yaéré et tableau de la chronique des teneurs en tritium des pluies à N'Djamena.

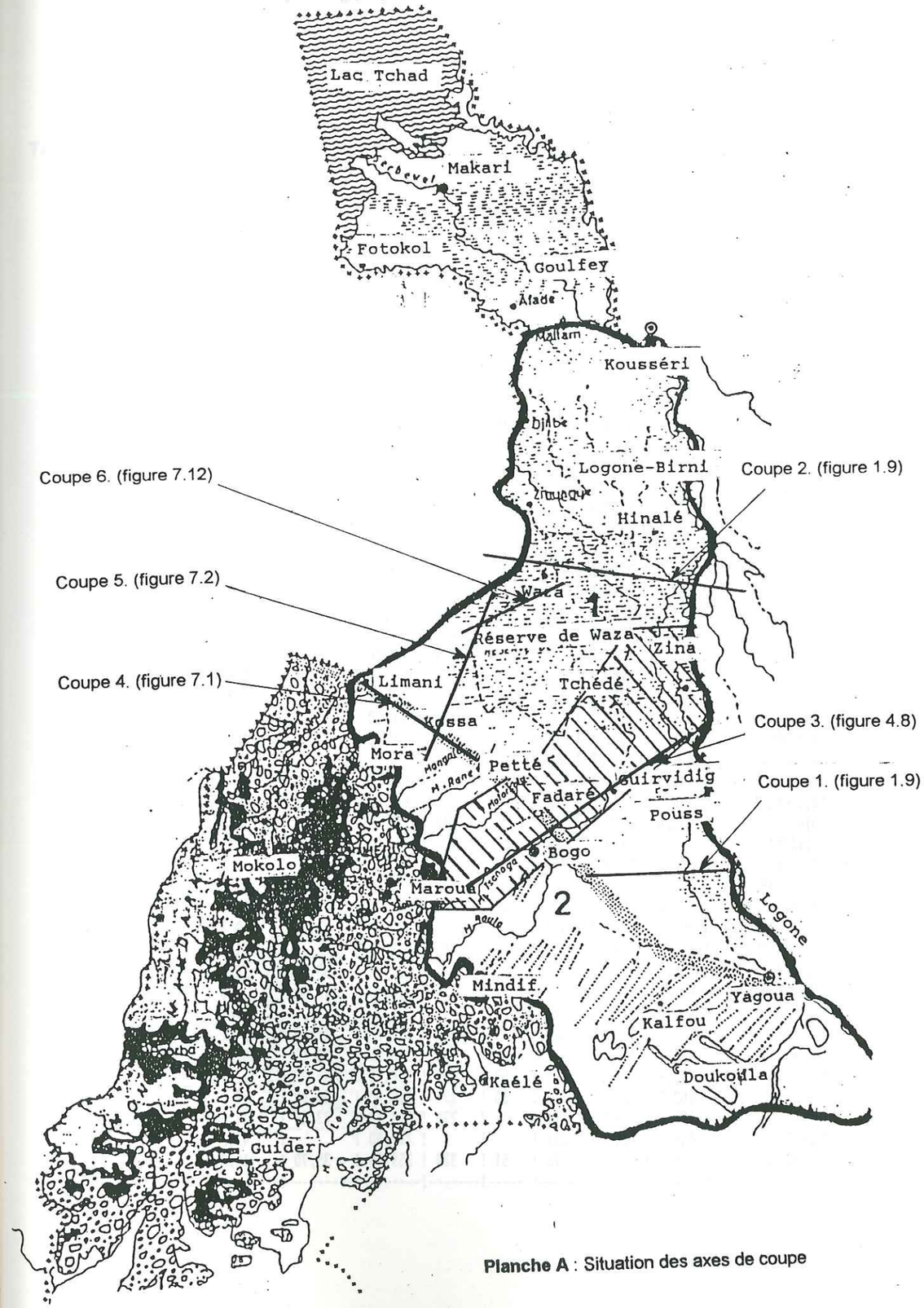


Planche A : Situation des axes de coupe

Tableau A4.1a - Caractéristiques géométriques et hydrauliques des ouvrages de captage.

Localité	X (km)	Y (km)	Z (m)	Prof. (m)	Mur (m)	NP (m)	Epais. (m)	NS (m)
Adya	430,7	1184,4	367	32	335	342,90	7,90	24,1
Alagarno	467,1	1217,2	309	85	224	274,20	50,20	34,8
Alagarno Gouna	463,5	1217,2	309	81	228	273,10	45,10	35,9
Alawa	483,5	1228,1	304	26	278			
Alvakai I	499,9	1220,8	309			305,10		3,9
Alvakai II	479,9	1219,0	309	28	281			
Andirni	467,1	1224,5	309	95	214	276,80	62,80	32,2
Assideo	430,7	1182,6	367	43	324	340,70	16,70	26,3
Balaza Alcali	441,7	1182,6	358	37	321	342,53	21,53	15,47
Balaza Garre	441,7	1182,6	358	41	317	339,90	22,90	18,1
Balaza Louane	439,8	1182,6	363	40	323	346,50	23,50	16,5
Balaza Louane	439,8	1182,6	363	37	326	347,70	21,70	15,3
Balda	461,7	1200,8	320	28	292			
Balda	461,7	1200,8	320	48	272	302,20	30,20	17,8
Balda	463,5	1200,8	320	38	282	302,90	20,90	17,1
Balda	461,7	1200,8	320	38	282	308,70	26,70	11,3
Balda	461,7	1200,8	320	40	280	308,30	28,30	11,7
Balda	463,5	1200,8	320	39	281	299,20	18,20	20,8
Bogo	456,2	1188,1	330	50	280	320,45	40,45	9,55
Bogo I	456,2	1188,1	330	48	282	317,72	35,72	12,28
Danki	459,9	1195,4	330	35	295	310,90	15,90	19,1
Dieguéré	476,2	1231,8	307			290,40		16,6
Dieguéré	476,2	1231,8	307			290,60		16,4
Diguir	445,3	1186,3	354	44	310	342,20	32,20	11,8
Djarengol	430,7	1175,3	385	35	350	373,20	23,20	11,8
Djarengol	432,6	1177,2	385	43	342	372,80	30,80	12,2
Djiddel	472,6	1197,2	321	35	286	308,00	22,00	13
Djiddel	472,6	1197,2	321			298,80		22,2
Djinabalam	476,2	1219,0	309	37	272	291,40	19,40	17,6
Djinabalam	476,2	1219,0	309	40	269	291,30	22,30	17,7
Fadaré Abbawa	456,2	1206,3	323	43	280	313,20	33,20	9,8
Fadaré Abbawa	456,2	1206,3	323	40	283	311,10	28,10	11,9
Gada Bouwol	436,2	1180,8	370	49	321	354,20	33,20	15,8
Gada Louggol	448,9	1200,8	334	39	295	314,00	19,00	20
Gado mayo	469,0	1195,4	340	14	326	315,37		24,63
Gayak	430,7	1180,8	370	29	341	352,80	11,80	17,2
Gayak	430,7	1179,0	370	20	350	353,62	3,62	16,38
Guingley	465,3	1193,5	326	57	269	314,98	45,98	11,02
Guingley	463,5	1191,7	326	50	276	316,40	40,40	9,6
Guirvidig	481,7	1204,5	314	36	278	301,40	23,40	12,6
Habillé	465,3	1215,4	312			270,80		41,2
Hardé Yana	439,8	1179,0	375	51	324	359,70	35,70	15,3

Tableau A4.1b - Caractéristiques géométriques et hydrauliques des ouvrages de captage.

Localité	X (km)	Y (km)	Z (m)	Prof. (m)	Mur (m)	NP (m)	Epais. (m)	NS (m)
Kaheo	441,7	1168,1	350	25	325	342,57	17,57	7,43
Kaodjiga	454,4	1199,0	340	50	290	323,70	33,70	16,3
Kaodjiga	454,4	1199,0	340	46	294	322,90	28,90	17,1
Karagari	443,5	1189,9	350			334,90		15,1
Khoudouba	498,1	1255,4	304	37	267			
Kodek	436,2	1180,8	370	43	327	355,00	28,00	15
Kossewa	428,9	1186,3	380	57	323	350,60	27,60	29,4
Kourdaya	461,7	1202,6	323	55	268	297,00	29,00	26
Louba Louba	461,7	1211,7	318	67	251	285,30	34,30	32,7
Madaka	454,4	1189,9	348	23	325	339,50	14,50	8,5
Madaka	454,4	1189,9	348	22	326	340,00	14,00	8
Madidé	458,0	1197,2	335	47	288	319,40	31,40	15,6
Madidé	458,0	1197,2	335	50	285	317,50	32,50	17,5
Marona	496,3	1253,6	304	36	268	273,54	5,54	30,46
Massourdouba	436,2	1188,1	358	35	323	331,20	8,20	26,8
Mayel Guinadji	447,1	1193,5	348	50	298	331,80	33,80	16,2
Mazgueu	496,3	1250,0	304	28	276			
Meringué	465,3	1199,0	340	61	279	323,00	44,00	17
Mongossi	478,1	1211,7	309	59	250	277,20	27,20	31,8
Mororo	458,0	1189,9	331	53	278	321,10	43,10	9,9
Nanidjam	445,3	1195,4	348	43	305	334,40	29,40	13,6
Ngaba Mango	448,9	1199,0	330	54	276	305,40	29,40	24,6
Ngarao	448,9	1189,9	340	37	303	330,60	27,60	9,4
Ngodeni	499,9	1260,9	302	34	268			
Nguermé I	467,1	1220,8	309	75	234	274,40	40,40	34,6
Nguermé II	467,1	1222,7	309	85	224	275,90	51,90	33,1
Ouro Aladji	445,3	1186,3	350	37	313	341,36	28,36	8,64
Ouro Kaidal	436,2	1175,3	380	53	327	370,02	43,02	9,98
Ouro Yaya	459,9	1191,7	331	57	274			
Sawao	447,1	1188,1	348	46	302	341,00	39,00	7
Sindigawo	430,7	1179,0	370	40	330	354,00	24,00	16
Tchabaol	465,3	1195,4	326	52	274	305,40	31,40	20,6
Tchaloudi	438,0	1186,3	360	45	315	348,12	33,12	11,88
Tchédé	481,7	1239,0	305			297,50		7,5
Tchédé	481,7	1239,0	305			297,20		7,8
Tchofnaguel	438,0	1191,7	356	57	299	325,10	26,10	30,9
Yoldé Tchoukol	454,4	1202,6	341	48	293	318,50	25,50	22,5
Zina	496,3	1246,3	305	32	273			
Zwang	489,0	1242,7	305	30	275			

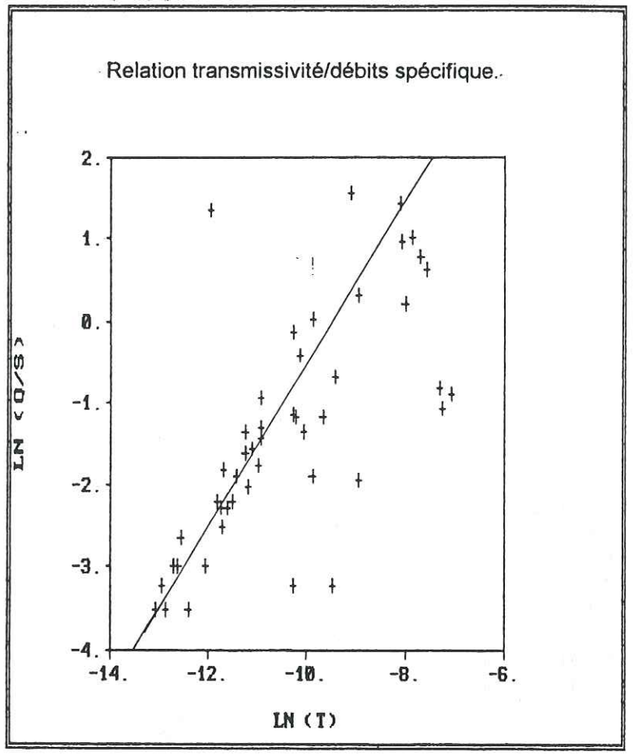


Figure A4.1. - Relation transmissivité/débits spécifique en coordonnées logarithmiques.

Tableau A5.1a - Résultats des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

LOCALITE	X (km)	Y (km)	Z (m)	Cond. (µS/cm)	pH	t (°C)	Date
Adya	430,7	1184,4	367	700	7,5	33,0	29/3/90
Alagarno	467,1	1217,2	309	834	7,8	31,0	31/10/89
Alagarno	467,1	1217,2	309	360	7,5	31,0	04/3/90
Alagarno	467,1	1217,2	309	692	7,5	32,0	22/6/90
Alagarno Gouna	463,5	1217,2	309	460	7,0	31,0	9/12/90
Andirni	467,1	1224,5	309	290	8,0	32,0	29/5/90
Andirni	467,1	1224,5	309	606	7,4	31,1	22/6/90
Andirni	467,1	1224,5	309	350	7,0		3/10/90
Andirni	467,1	1224,5	309	674	6,9	31,2	30/10/89
Andirni	467,1	1224,5	309	672	7,4	31,0	22/6/90
Assideo	430,7	1182,6	367	580	7,0	31,0	4/4/90
Bakouré	452,6	1202,6	328	259	6,9	32,4	30/10/89
Bakouré	452,6	1202,6	328	260	6,4	33,0	2/10/90
Bakouré	452,6	1202,6	328	245	7,2	32,4	22/6/90
Balaza Louane	439,8	1182,6	363	270	7,5	33,0	23/12/90
Balaza Louane	439,8	1182,6	363	360	7,5	33,0	22/12/90
Balda	461,7	1200,8	320	180	6,4	31,5	2/10/90
Balda	463,5	1200,8	320	320	7,5	31,0	16/11/90
Balda	461,7	1200,8	320	460	7,0	31,0	10/11/90
Balda	463,5	1200,8	320	130	7,0	31,0	12/11/90
Balda	461,7	1200,8	320	143	6,8	31,4	31/10/89
Balda	461,7	1200,8	320	303	7,2	31,5	31/10/89
Balda	461,7	1200,8	320	300	7,0	31,0	07/11/90
Balda	461,7	1200,8	320	207	7,2	31,8	23/6/90
Balda	461,7	1200,8	320	290	7,5	31,0	04/11/90
Balda	461,7	1200,8	320	216	7,2	31,1	31/10/89
Bogo	456,2	1188,1	330	140	6,0	30,0	2/10/90
Bogo	456,2	1188,1	330	272	7,9	32,2	23/6/90
Danki	459,9	1195,4	330	440			28/11/84
Diegueré	476,2	1231,8	307	330	6,5	33,4	3/10/90
Diegueré	476,2	1231,8	307	346	7,2	29,8	22/6/90
Diguir	445,3	1186,3	354	240	7,0	31,0	17/12/90
Diguir	445,3	1186,3	354	200	6,5	30,0	30/4/90
Djarengol	430,7	1175,3	385	250	7,0	32,0	19/4/90
Djarengol	432,6	1177,2	385	250	7,5	32,0	23/4/90
Djarengol	430,7	1175,3	385	240	7,0	33,0	17/4/90
Djiddel	472,6	1197,2	321	430	7,5	32,0	9/6/90
Djiddel	472,6	1197,2	321	650	7,8	31,0	5/10/90
Djiddel	472,6	1197,2	321	530	7,9	31,4	5/10/90
Djiddel	472,6	1197,2	321	410	7,5	33,0	8/6/90
Djiddel	472,6	1197,2	321	668	7,4	31,8	23/6/90
Djinabalam	476,2	1219,0	309	480	8,0	33,0	6/1/90
Djinabalam	476,2	1219,0	309	460	8,0	33,0	7/1/90
Fadaré	456,2	1206,3	323	769	8,8	31,0	22/6/90
Fadaré	456,2	1206,3	323	501	6,7	29,7	30/10/89
Fadaré	456,2	1206,3	323	281	6,9	31,2	30/10/89
Fadaré	456,2	1206,3	323	290	7,7	30,0	22/6/90
Fadaré	456,2	1206,3	323	740	7,0	31,6	3/10/90
Fadaré	456,2	1206,3	323	390	6,4	31,0	2/10/90
Fadare Abbawa	456,2	1206,3	323	420	7,5	31,0	29/11/90
Fadare Abbawa	456,2	1206,3	323	310	7,5	31,0	30/11/90
Gada Bouwol	436,2	1180,8	370	400	7,5	30,0	24/4/90
Gada Louggol	448,9	1200,8	334	300	6,5	32,0	16/10/90
Gayak	430,7	1180,8	370	260	7,0	31,0	5/6/90
Guingley	465,3	1193,5	326	440	7,0	31,1	5/10/90
Guingley	465,3	1193,5	326	480	7,0	31,0	5/10/90
Guingley	465,3	1193,5	326	476	8,0	31,1	23/6/90

Tableau A5.1b - Résultats des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

LOCALITE	X (km)	Y (km)	Z (m)	Cond. (µS/cm)	pH	t (°C)	Date
Guirvidig	481,7	1204,5	314	507	7,6	31,6	23/6/90
Guirvidig	481,7	1204,5	314	530	6,4	33,0	5/10/90
Habillé	465,3	1215,4	312	487	7,7	31,8	22/6/90
Habillé	465,3	1215,4	312	510	6,8	33,0	3/10/90
Habillé	465,3	1215,4	312	492	7,5	30,7	30/10/89
Hardé Yana	439,8	1179,0	375	380	7,5	31,0	23/4/90
Hardé Yana	439,8	1179,0	375	300	7,0	30,0	29/4/90
Kaodjiga	454,4	1199,0	340	230	7,5	31,0	17/10/90
Kaodjiga	454,4	1199,0	340	190	7,5	31,0	17/10/90
Karagari	443,5	1189,9	350	420	7,0	32,8	2/10/90
Karagari	443,5	1189,9	350	380	7,0	31,5	2/10/90
Karagari	443,5	1189,9	350	428	6,9	32,1	30/10/89
Kodek	436,2	1180,8	370	320	7,0	30,0	28/4/90
Kodek	436,2	1180,8	370	310	7,5	31,0	12/4/90
Kodek	436,2	1180,8	370		7,0	30,0	18/4/90
Kossewa	428,9	1186,3	380	720	7,5	33,0	13/4/90
Kossewa	428,9	1186,3	380	640	7,5	33,0	16/4/90
Kourdaya	461,7	1202,6	323	370	7,0	33,0	17/5/90
Kourdaya	461,7	1202,6	323	290	7,0	33,0	8/5/90
Kourdaya	461,7	1202,6	323	320	6,2	31,5	2/10/90
Kourdaya	461,7	1202,6	323	265	7,0	33,0	11/5/90
Louba Louba	461,7	1211,7	318	640	7,0	32,0	3/10/90
Louba Louba	461,7	1211,7	318	340	7,0	31,0	7/12/90
Louba Louba	461,7	1211,7	318	462		32,7	22/6/90
Louba Louba	461,7	1211,7	318	602	6,9	30,9	30/10/89
Madaka	454,4	1189,9	348	135	6,5	30,0	12/5/90
Madaka	454,4	1189,9	348	110	6,5	29,0	11/5/90
Madidé	458,0	1197,2	335	250	7,0	32,0	27/5/90
Madidé	458,0	1197,2	335	270	7,0	32,0	26/10/90
Madidé	458,0	1197,2	335	290	7,0	31,0	25/10/90
Magaldao	459,9	1209,9	320	280	6,5	33,0	3/10/90
Magaldao	459,9	1209,9	320	316	6,8	31,6	30/10/89
Magaldao	459,9	1209,9	320	277		31,2	22/6/90
Massourdouba	436,2	1188,1	358	420	7,5	33,0	2/4/90
Mayel Guinadji	447,1	1193,5	348	300	7,0	30,0	12/10/90
Mayel Guinadji	447,1	1193,5	348	240	7,0	30,0	13/10/90
Nanidjam	445,3	1195,4	348	490	7,0	31,0	20/11/90
Ngaba	448,9	1199,0	330	206	6,9	30,6	22/6/90
Ngaba	448,9	1199,0	330	372	6,9	30,1	30/10/89
Ngaba Mango	448,9	1199,0	330	270	7,5	31,0	16/10/90
Ngaba Mango	448,9	1199,0	330	250	7,5	31,0	15/10/90
Ngarao	448,9	1189,9	340	130	6,5	30,0	19/5/90
Ngarao	448,9	1189,9	340	140	6,5	30,0	21/5/90
Nguermé I	467,1	1220,8	309	290	8,0	33,0	23/5/90
Nguermé II	467,1	1222,7	309	580	7,0	31,0	5/12/90
Sawao	447,1	1188,1	348	170	7,0	30,0	7/5/90
Sawao	447,1	1188,1	348	270	7,0	30,0	17/5/90
Sawao	447,1	1188,1	348	160	6,5	30,0	9/5/90
Sindigawo	430,7	1179,0	370	440	7,5	32,0	9/4/90
Tchabaol	465,3	1195,4	326	250	7,0	31,0	12/11/90
Tchabaol	465,3	1195,4	326	300	7,0	31,0	14/11/90
Tchédé	481,7	1239,0	305	693	7,4	29,5	22/6/90
Tchédé	481,7	1239,0	305	620	6,7	32,0	3/10/90
Tchofnaguel	438,0	1191,7	356	840	7,5	31,0	24/11/90
Yaya Soudani	438,0	1191,7	356	600	7,5	31,0	25/11/90
Yoldé Tchoukol	454,4	1202,6	341	640	7,0	31,0	2/11/90
Zagara	481,7	1235,4	305	400	7,0	31,0	2/1/91

Tableau A5.2a. - Résultats d'analyse chimique exprimés en milligramme par litre.

	localité	X (km)	Y (km)	HCO3 (mg/l)	CL (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Somme (mg/l)
1	Alagarno (P)	467,8	1217,6	467,26	15,62	5,76	28,52	49,20	9,84	126,04	7,80	710,04
2	Andirni (P)	467,0	1223,0	185,44	14,20	6,24	0,00	8,80	0,84	65,32	2,73	283,57
3	Andirni (F)	467,0	1223,0	183,61	9,59	6,24	0,00	5,40	1,44	69,23	2,73	278,24
4	Andirni (P)	467,0	1223,0	358,07	9,59	15,36	2,48	27,40	7,68	98,44	4,29	523,31
5	Bakouré (F)	453,6	1203,2	158,60	1,78	2,88	14,26	27,40	2,64	25,30	3,12	235,98
6	Balda Agri (P)	462,4	1119,4	76,25	3,91	8,64	23,56	13,60	2,16	18,86	7,80	154,78
7	Balda Agri (P)	462,4	1119,4	87,84	3,91	11,52	16,74	15,60	1,32	20,24	6,24	163,41
8	Bogo piézo	460,0	1188,0	156,16	0,71	13,44	2,48	33,40	4,32	19,32	3,90	233,73
9	Bogo Marché (F)	460,0	1188,0	95,77	0,71	1,44	3,72	15,00	2,04	16,33	3,12	138,13
10	Bogo piézo	460,0	1188,0	160,43	2,84	5,28	10,54	33,20	3,36	18,86	5,85	240,36
11	Diéguéré (F)	475,4	1231,0	193,37	1,78	2,40	8,68	35,20	7,32	17,02	8,97	274,74
12	Diéguéré (F)	475,4	1231,0	207,40	4,97	4,80	16,74	39,80	7,20	20,93	12,48	314,32
13	Djamegana (F)	467,0	1220,0	214,72	15,98	9,60	0,00	11,00	1,20	77,05	3,12	332,67
14	Djiddel (F)	472,2	1195,5	269,62	1,42	4,80	3,10	34,00	5,64	46,23	5,85	370,66
15	Djiddel (P)	472,2	1195,5	251,93	3,20	4,32	11,78	25,20	11,64	48,53	6,63	363,23
16	Fadaré(P)	456,0	1206,8	173,85	0,71	10,08	1,24	29,60	4,80	31,74	2,34	254,36
17	Fadaré (F)	456,0	1206,8	317,20	5,68	9,12	11,16	10,20	5,52	96,14	3,12	458,14
18	Fadaré (P)	456,0	1206,8	145,18	23,08	12,96	34,72	43,00	6,72	25,07	11,70	302,43
19	Fadaré (P)	456,0	1206,8	175,07	2,13	2,40	1,86	35,40	3,36	17,71	2,34	240,27
20	Guingley P	464,0	1191,7	196,42	2,49	5,28	5,58	22,00	7,08	36,80	1,56	277,21
21	Guingley F1	464,0	1191,7	189,10	2,13	4,80	0,00	19,80	4,68	40,48	1,95	262,94
22	Guingley F2	464,0	1191,7	173,24	4,62	16,32	13,64	22,20	4,32	43,01	3,90	281,25
23	Guirvidig (P)	482,4	1202,6	240,34	1,42	0,96	0,00	29,80	12,36	27,14	2,34	314,36
24	Habillé (P)	464,8	1215,4	290,36	7,10	12,96	7,44	34,40	3,48	74,06	6,24	436,04
25	Habillé (P)	464,8	1215,4	243,39	3,55	12,96	6,82	16,00	5,52	71,76	4,29	364,29
26	Kolagari (F)	444,0	1188,0	276,33	2,84	6,24	3,72	25,00	7,56	63,25	0,78	385,72
27	Koragari (P)	444,0	1188,0	262,91	3,91	7,68	4,96	21,60	2,88	69,46	3,51	376,91
28	Kourdaya (F)	462,4	1202,6	143,35	6,75	20,16	27,28	33,00	4,92	25,53	4,68	265,67
29	Louba Louba (P)	462,4	1210,8	272,06	3,55	4,80	9,30	38,20	6,12	43,01	7,02	384,06
30	Louba Louba (P)	462,4	1210,8	289,14	3,91	9,60	6,82	50,00	7,44	37,49	7,41	411,81
31	Magaldao (P)	460,0	1207,4	184,22	0,71	12,96	1,24	32,60	5,40	26,91	3,12	267,16
32	Magaldao (P)	460,0	1207,4	190,32	1,42	13,44	1,86	33,00	4,32	29,90	3,51	277,77
33	Ngaba (P)	450,0	1196,8	123,83	1,42	0,96	6,20	24,40	2,40	12,88	3,51	175,60
34	Tchédé (F)	482,8	1236,8	283,04	2,13	3,36	2,48	31,80	19,68	18,63	37,05	398,17
35	Tchédé (F)	482,8	1236,8	267,79	0,71	3,36	3,10	25,20	18,00	16,56	36,66	371,38

Tableau A5.2b. - Résultats d'analyse chimique exprimés en milliéquivalent par litre.

	localité	HCO3 (méq/l)	CL (méq/l)	SO4 (méq/l)	NO3 (méq/l)	Ca (méq/l)	Mg (méq/l)	Na (méq/l)	K (méq/l)	SiO2 (méq/l)	COND (µS/cm)	pH	Anions (méq/l)	Cations (méq/l)
1	Alagarno (P)	7,66	0,44	0,12	0,46	2,46	0,82	5,48	0,20	1,63	770	8,09	8,68	8,96
2	Andirni (P)	3,04	0,40	0,13	0,00	0,44	0,07	2,84	0,07		350	6,90	3,57	3,42
3	Andirni (F)	3,01	0,27	0,13	0,00	0,27	0,12	3,01	0,07	1,69	321	7,98	3,41	3,47
4	Andirni (P)	5,87	0,27	0,32	0,04	1,37	0,64	4,28	0,11	1,85	575	8,28	6,50	6,40
5	Bakouré (F)	2,60	0,05	0,06	0,23	1,37	0,22	1,10	0,08		260	6,44	2,94	2,77
6	Balda Agri (P)	1,25	0,11	0,18	0,38	0,68	0,18	0,82	0,20	0,93	200	7,03	1,92	1,88
7	Balda Agri (P)	1,44	0,11	0,24	0,27	0,78	0,11	0,88	0,16		180	6,42	2,06	1,93
8	Bogo piézo	2,56	0,02	0,28	0,04	1,67	0,36	0,84	0,10	1,10	263	7,60	2,90	2,97
9	Bogo Marché (F)	1,57	0,02	0,03	0,06	0,75	0,17	0,71	0,08		140	6,00	1,68	1,71
10	Bogo piézo	2,63	0,08	0,11	0,17	1,66	0,28	0,82	0,15	1,44	271	7,66	2,99	2,91
11	Diéguéré (F)	3,17	0,05	0,05	0,14	1,76	0,61	0,74	0,23	1,14	315	8,04	3,41	3,34
12	Diéguéré (F)	3,40	0,14	0,10	0,27	1,99	0,60	0,91	0,32		330	6,50	3,91	3,82
13	Djamegana (F)	3,52	0,45	0,20	0,00	0,55	0,10	3,35	0,08		390	6,65	4,17	4,08
14	Djiddel (F)	4,42	0,04	0,10	0,05	1,70	0,47	2,01	0,15		650	7,83	4,61	4,33
15	Djiddel (P)	4,13	0,09	0,09	0,19	1,26	0,97	2,11	0,17	1,41	405	7,85	4,50	4,51
16	Fadaré(P)	2,85	0,02	0,21	0,02	1,48	0,40	1,38	0,06	1,58	269	7,84	3,10	3,32
17	Fadaré (F)	5,20	0,16	0,19	0,18	0,51	0,46	4,18	0,08		240	7,00	5,73	5,23
18	Fadaré (P)	2,38	0,65	0,27	0,56	2,15	0,56	1,09	0,30		390	6,40	3,86	4,10
19	Fadaré (P)	2,87	0,06	0,05	0,03	1,77	0,28	0,77	0,06	1,13	263	7,50	3,01	2,88
20	Guingley P	3,22	0,07	0,11	0,09	1,10	0,59	1,60	0,04	1,50	315	7,76	3,49	3,33
21	Guingley F1	3,10	0,06	0,10	0,00	0,99	0,39	1,76	0,05		170	6,80	3,26	3,19
22	Guingley F2	2,84	0,13	0,34	0,22	1,11	0,36	1,87	0,10		480	6,94	3,53	3,44
23	Guirvidig (P)	3,94	0,04	0,02	0,00	1,49	1,03	1,18	0,06	1,41	351	7,81	4,00	3,76
24	Habillé (P)	4,76	0,20	0,27	0,12	1,72	0,29	3,22	0,16		510	6,80	5,35	5,39
25	Habillé (P)	3,99	0,10	0,27	0,11	0,80	0,46	3,12	0,11	1,83	403	8,30	4,47	4,49
26	Kolagari (F)	4,53	0,08	0,13	0,06	1,25	0,63	2,75	0,02	1,31	415	7,97	4,80	4,65
27	Koragari (P)	4,31	0,11	0,16	0,08	1,08	0,24	3,02	0,09		380	6,90	4,66	4,43
28	Kourdaya (F)	2,35	0,19	0,42	0,44	1,65	0,41	1,11	0,12		320	6,20	3,40	3,29
29	Louba Louba (P)	4,46	0,10	0,10	0,15	1,91	0,51	1,87	0,18		640	6,90	4,81	4,47
30	Louba Louba (P)	4,74	0,11	0,20	0,11	2,50	0,62	1,63	0,19	1,84	453	7,75	5,16	4,94
31	Magaldao (P)	3,02	0,02	0,27	0,02	1,63	0,45	1,17	0,08	1,70	302	7,66	3,33	3,33
32	Magaldao (P)	3,12	0,04	0,28	0,03	1,65	0,36	1,30	0,09		280	6,50	3,47	3,40
33	Ngaba (P)	2,03	0,04	0,02	0,10	1,22	0,20	0,56	0,09	1,59	205	6,51	2,19	2,07
34	Tchédé (F)	4,64	0,06	0,07	0,04	1,59	1,64	0,81	0,95		620	6,66	4,81	4,99
35	Tchédé (F)	4,39	0,02	0,07	0,05	1,26	1,50	0,72	0,94	0,89	401	7,93	4,53	4,42

Tableau A5.2c. - Résultats d'analyse chimique exprimés en pourcent.

	localité	HCO3 (%)	CL (%)	SO4 (%)	NO3 (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	K (%)	Na+K (%)	Ca+Mg (%)	cl+NO3 (%)
1	Alagarno (P)	88,25	5,07	1,38	5,30	27,46	9,15	61,16	2,23	63,39	36,61	10,37
2	Andirni (P)	85,15	11,20	3,64	0,00	12,87	2,05	83,04	2,05	85,09	14,91	11,20
3	Andirni (F)	88,27	7,92	3,81	0,00	7,78	3,46	86,74	2,02	88,76	11,24	7,92
4	Andirni (P)	90,31	4,15	4,92	0,62	21,41	10,00	66,88	1,72	68,59	31,41	4,77
5	Bakouré (F)	88,44	1,70	2,04	7,82	49,46	7,94	39,71	2,89	42,60	57,40	9,52
6	Balda Agri (P)	65,10	5,73	9,38	19,79	36,17	9,57	43,62	10,64	54,26	45,74	25,52
7	Balda Agri (P)	69,90	5,34	11,65	13,11	40,41	5,70	45,60	8,29	53,89	46,11	18,45
8	Bogo piézo	88,28	0,69	9,66	1,38	56,23	12,12	28,28	3,37	31,65	68,35	2,07
9	Bogo Marché (F)	93,45	1,19	1,79	3,57	43,86	9,94	41,52	4,68	46,20	53,80	4,76
10	Bogo piézo	87,96	2,68	3,68	5,69	57,04	9,62	28,18	5,15	33,33	66,67	8,36
11	Diéguéré (F)	92,96	1,47	1,47	4,11	52,69	18,26	22,16	6,89	29,04	70,96	5,57
12	Diéguéré (F)	86,96	3,58	2,56	6,91	52,09	15,71	23,82	8,38	32,20	67,80	10,49
13	Djamegana (F)	84,41	10,79	4,80	0,00	13,48	2,45	82,11	1,96	84,07	15,93	10,79
14	Djiddel (F)	95,88	0,87	2,17	1,08	39,26	10,85	46,42	3,46	49,88	50,12	1,95
15	Djiddel (P)	91,78	2,00	2,00	4,22	27,94	21,51	46,78	3,77	50,55	49,45	6,22
16	Fadaré(P)	91,94	0,65	6,77	0,65	44,58	12,05	41,57	1,81	43,37	56,63	1,29
17	Fadaré (F)	90,75	2,79	3,32	3,14	9,75	8,80	79,92	1,53	81,45	18,55	5,93
18	Fadaré (P)	61,66	16,84	6,99	14,51	52,44	13,66	26,59	7,32	33,90	66,10	31,35
19	Fadaré (P)	95,35	1,99	1,66	1,00	61,46	9,72	26,74	2,08	28,82	71,18	2,99
20	Guingley P	92,26	2,01	3,15	2,58	33,03	17,72	48,05	1,20	49,25	50,75	4,58
21	Guingley F1	95,09	1,84	3,07	0,00	31,03	12,23	55,17	1,57	56,74	43,26	1,84
22	Guingley F2	80,45	3,68	9,63	6,23	32,27	10,47	54,36	2,91	57,27	42,73	9,92
23	Guirvidig (P)	98,50	1,00	0,50	0,00	39,63	27,39	31,38	1,60	32,98	67,02	1,00
24	Habillé (P)	88,97	3,74	5,05	2,24	31,91	5,38	59,74	2,97	62,71	37,29	5,98
25	Habillé (P)	89,26	2,24	6,04	2,46	17,82	10,24	69,49	2,45	71,94	28,06	4,70
26	Kolagari (F)	94,38	1,67	2,71	1,25	26,88	13,55	59,14	0,43	59,57	40,43	2,92
27	Koragari (P)	92,49	2,36	3,43	1,72	24,38	5,42	68,17	2,03	70,20	29,80	4,08
28	Kourdaya (F)	69,12	5,59	12,35	12,94	50,15	12,46	33,74	3,65	37,39	62,61	18,53
29	Louba Louba (P)	92,72	2,08	2,08	3,12	42,73	11,41	41,83	4,03	45,86	54,14	5,20
30	Louba Louba (P)	91,86	2,13	3,88	2,13	50,61	12,55	33,00	3,85	36,84	63,16	4,26
31	Magaldao (P)	90,69	0,60	8,11	0,60	48,95	13,51	35,14	2,40	37,54	62,46	1,20
32	Magaldao (P)	89,91	1,15	8,07	0,86	48,53	10,59	38,24	2,65	40,88	59,12	2,02
33	Ngaba (P)	92,69	1,83	0,91	4,57	58,94	9,66	27,05	4,35	31,40	68,60	6,39
34	Tchédé (F)	96,47	1,25	1,46	0,83	31,86	32,87	16,23	19,04	35,27	64,73	2,08
35	Tchédé (F)	96,91	0,44	1,55	1,10	28,51	33,94	16,29	21,27	37,56	62,44	1,55

Figure A 5.1

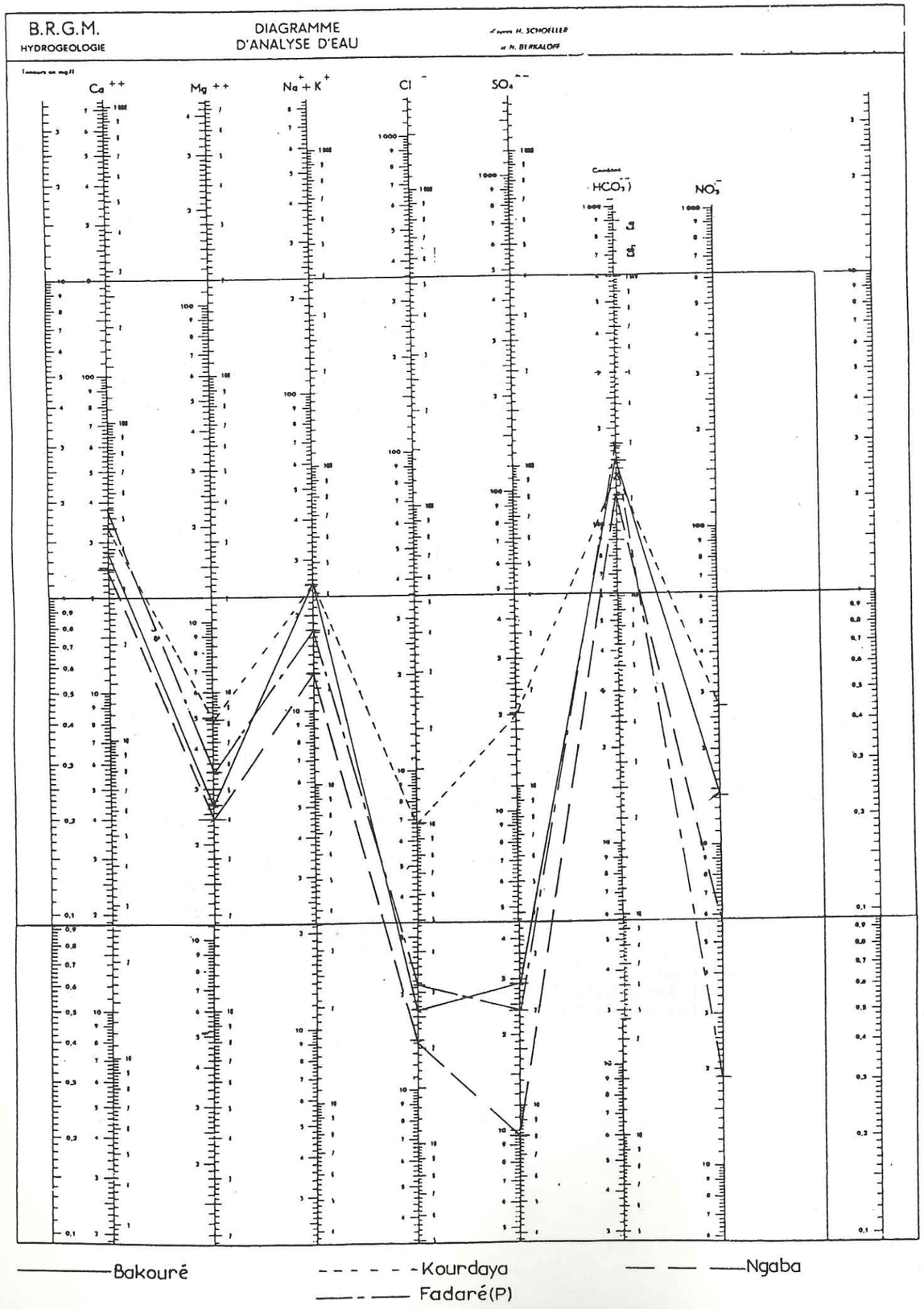


Figure A 5.2

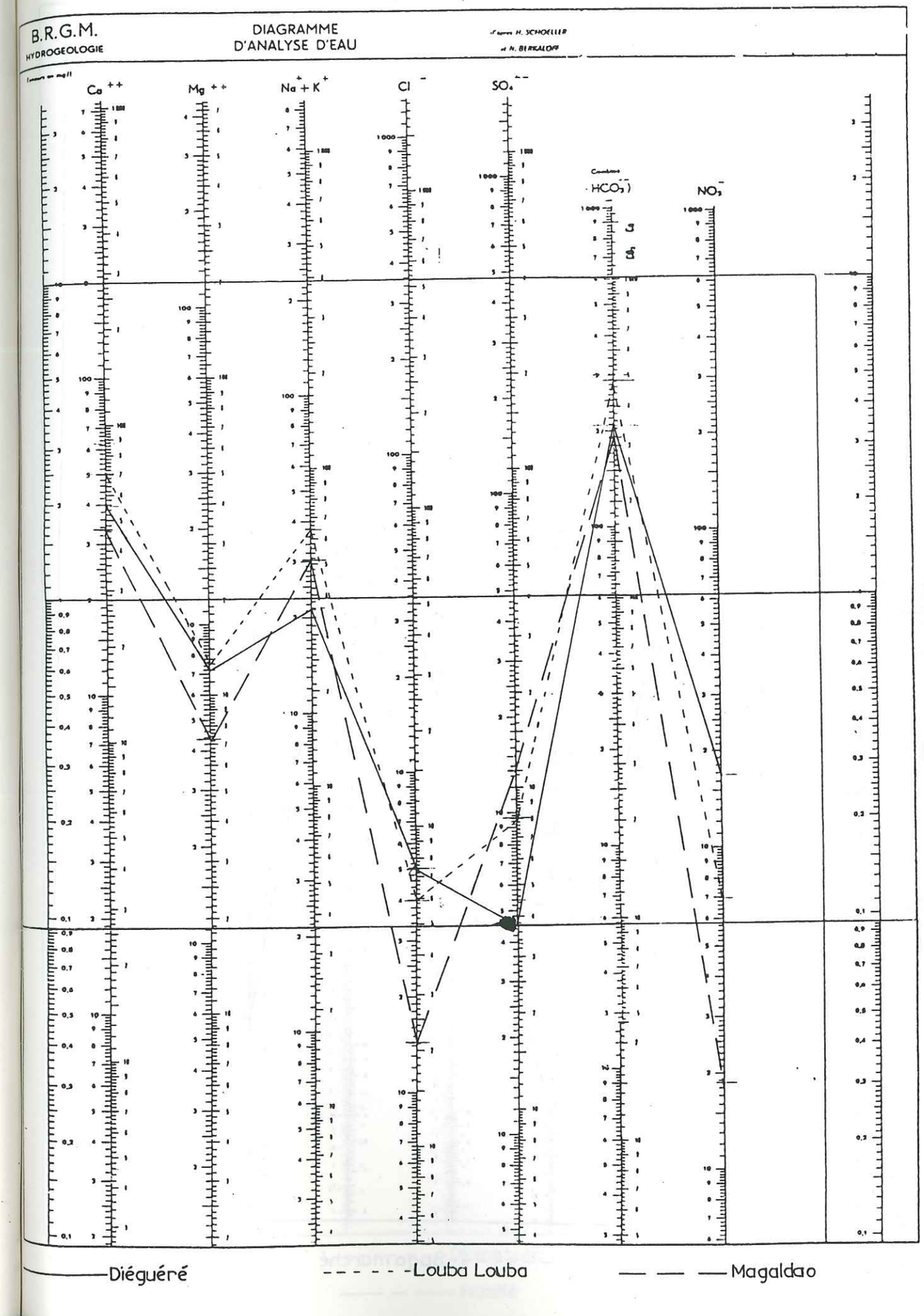


Figure A 5.3

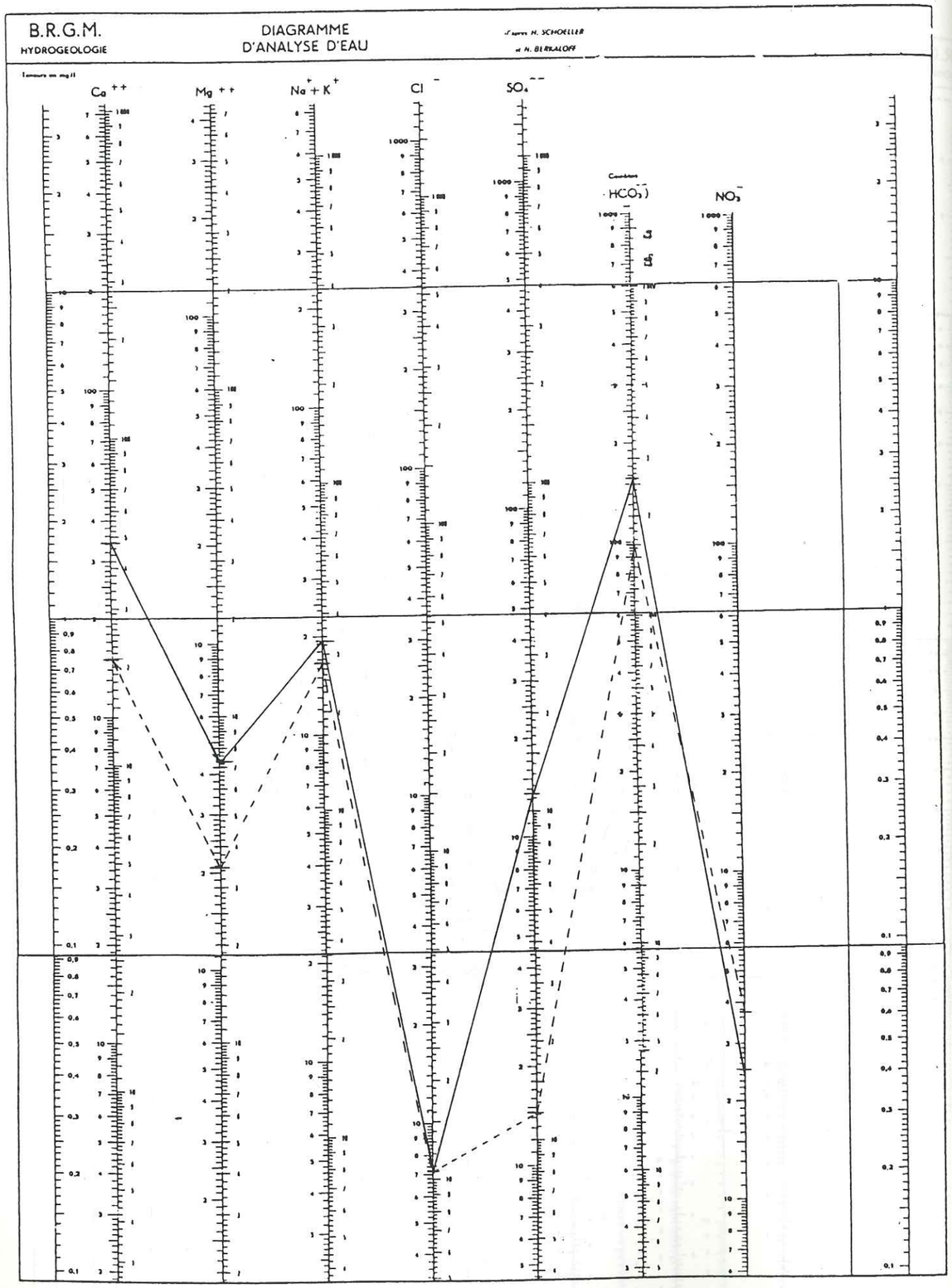


Figure A 5.4

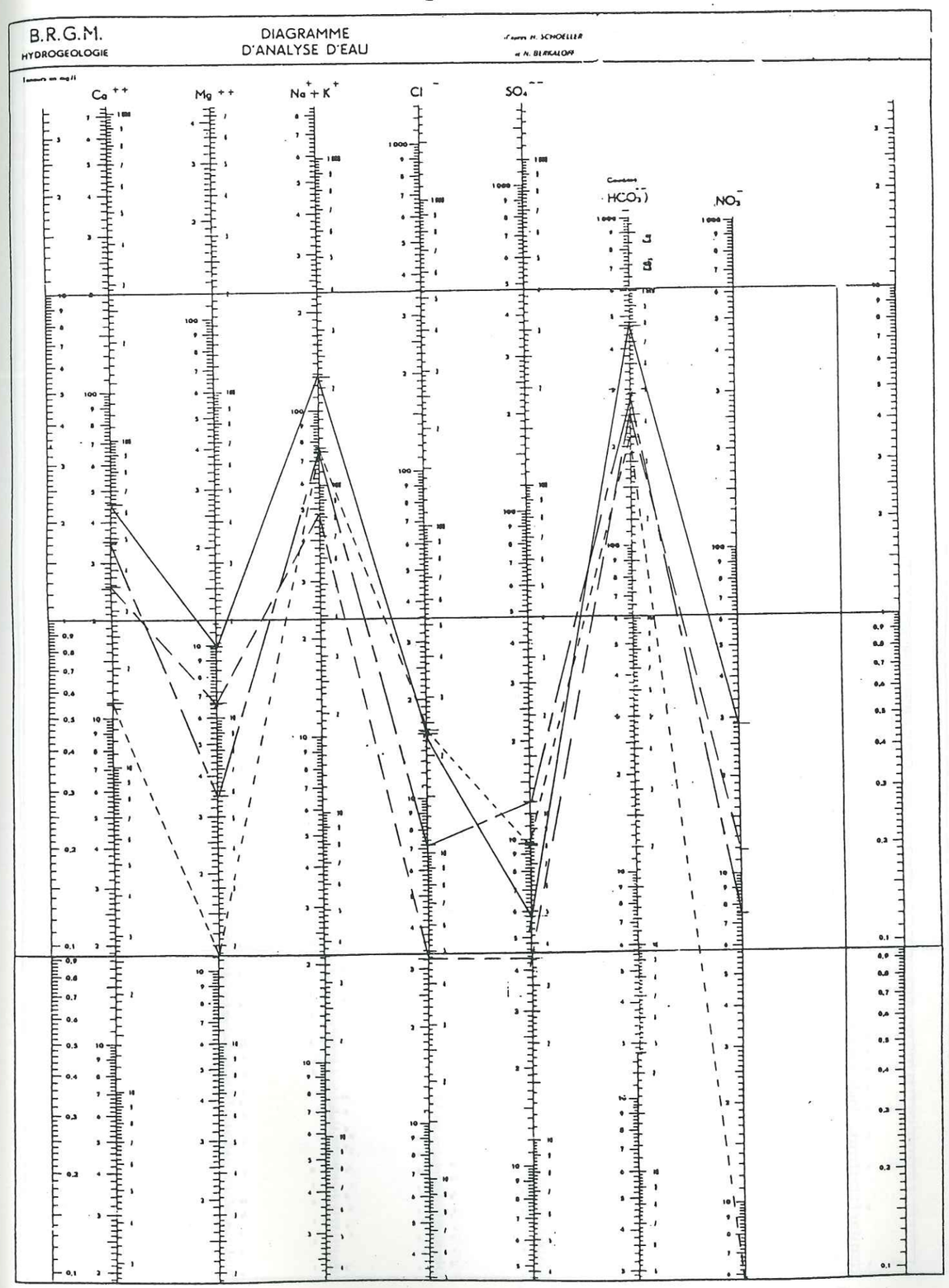


Figure A 5.5

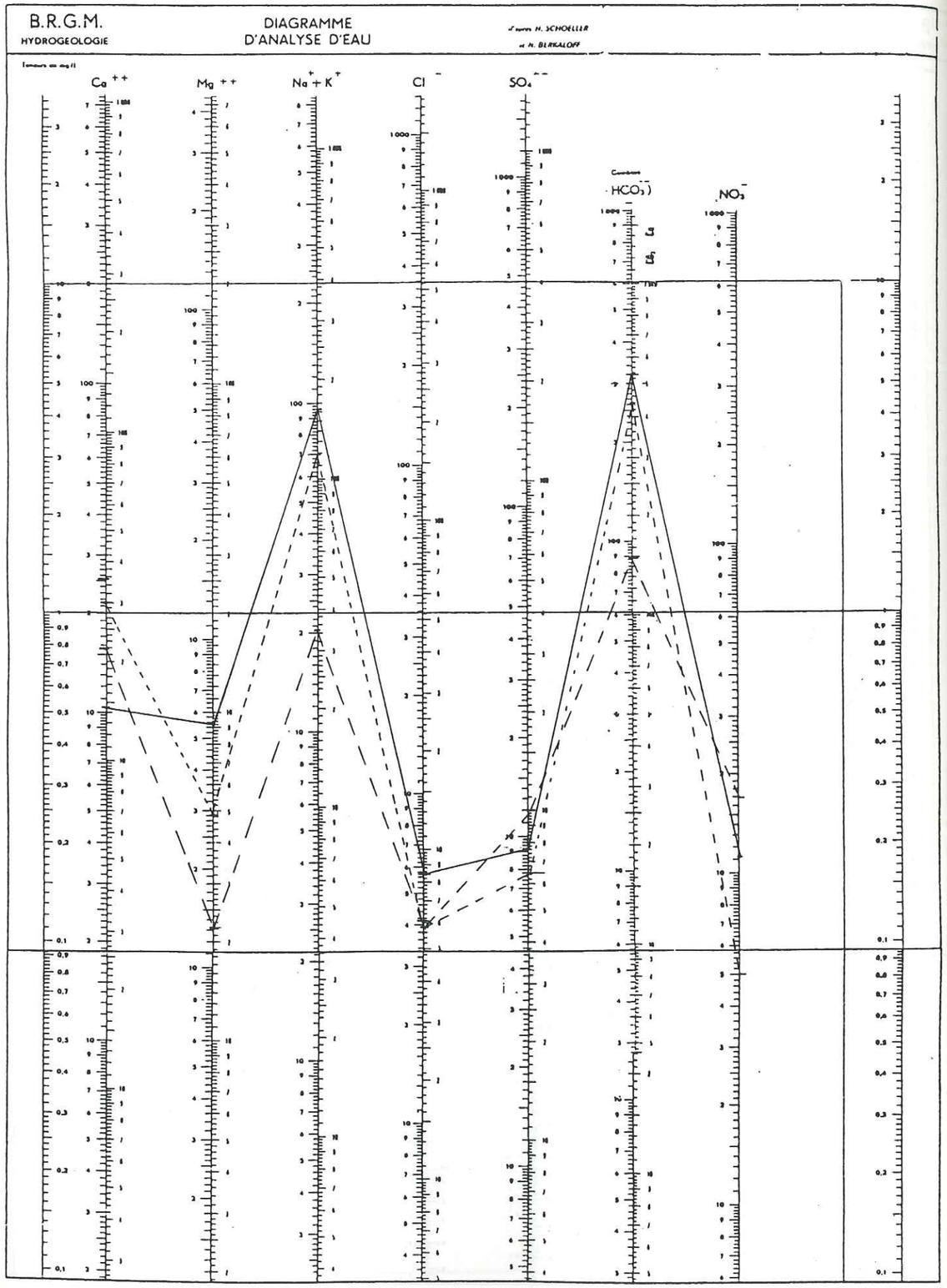


Figure A 5.6

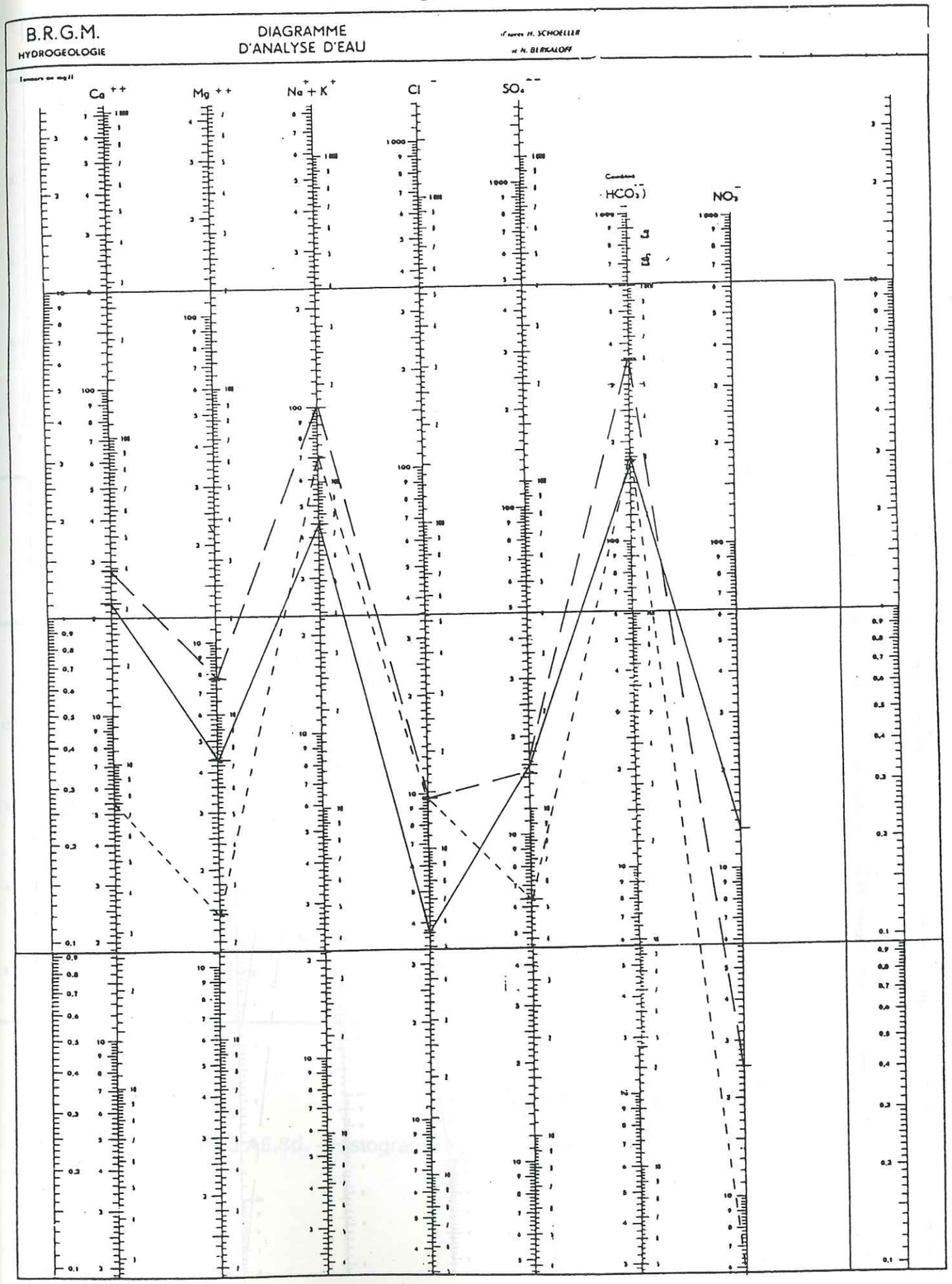
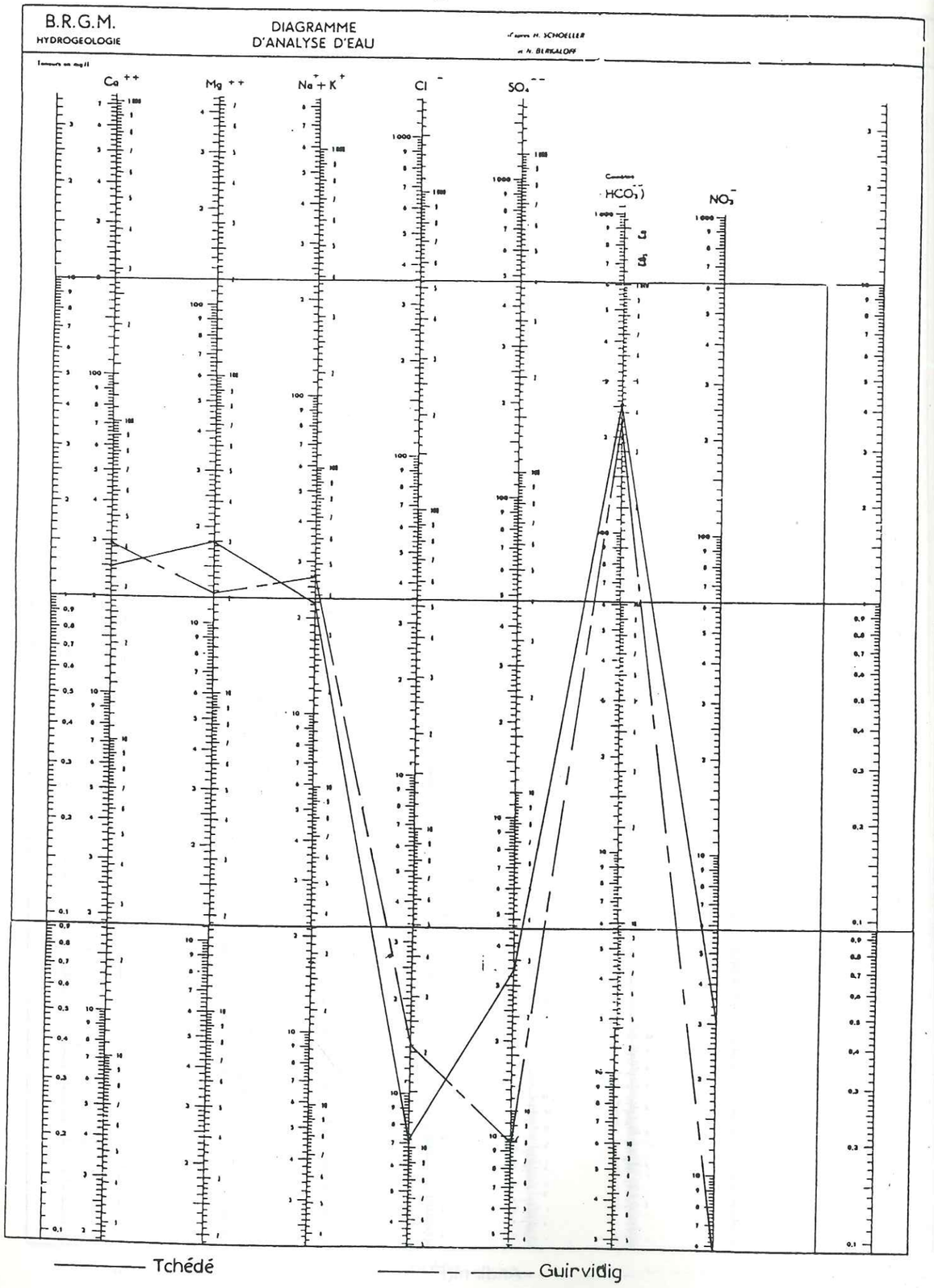
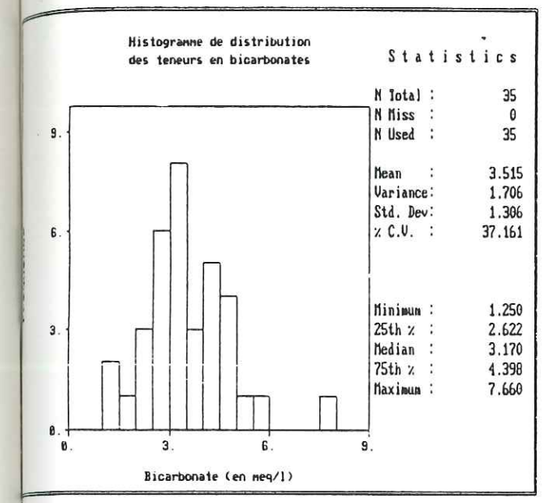
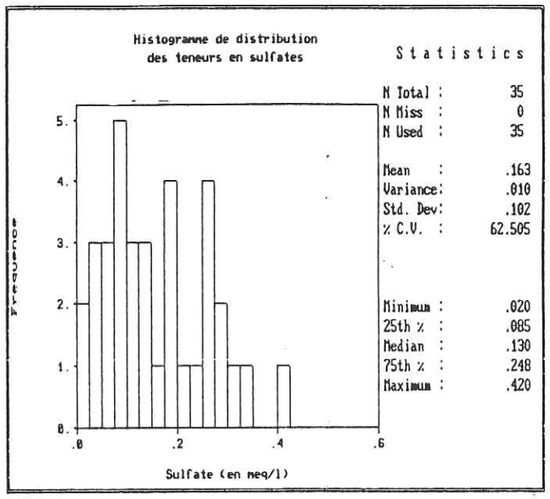


Figure A 5.7

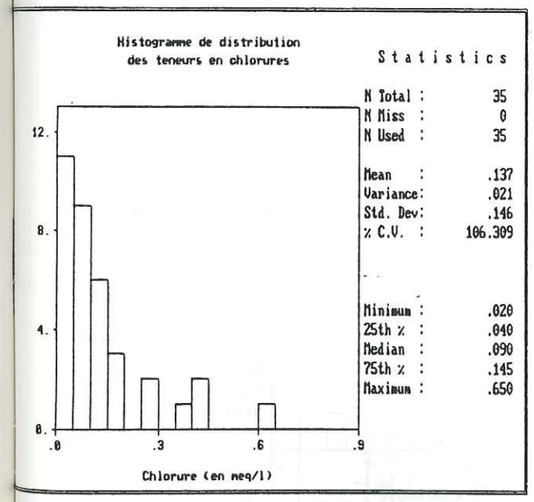




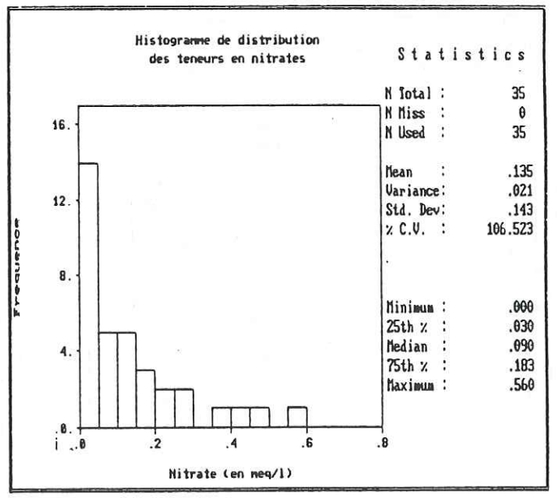
a/



b/

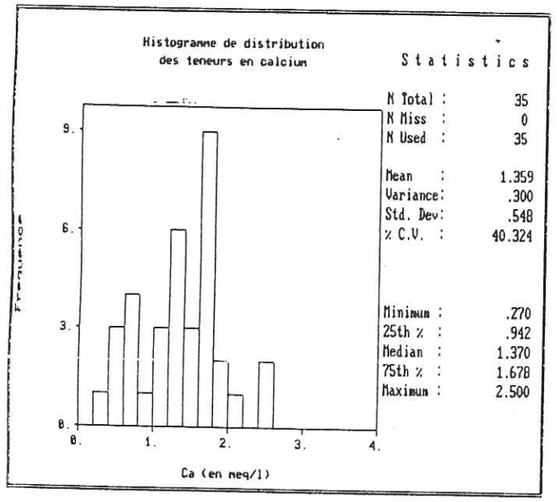


c/

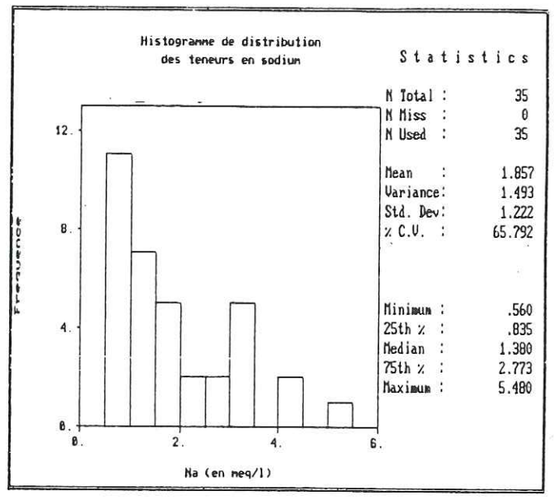


d/

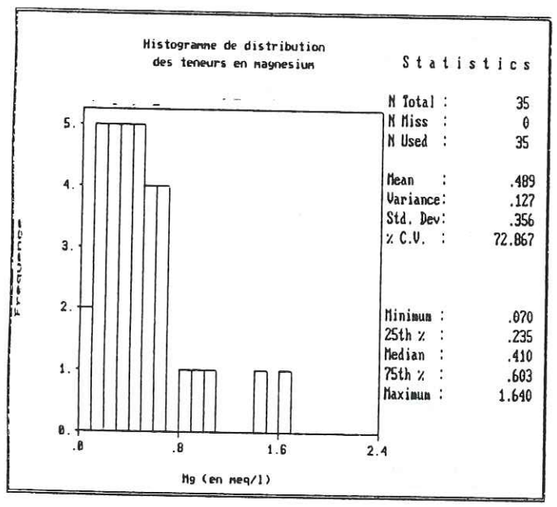
Figures A5.8a à A5.8d. - Histogrammes de distribution des teneurs en anions.



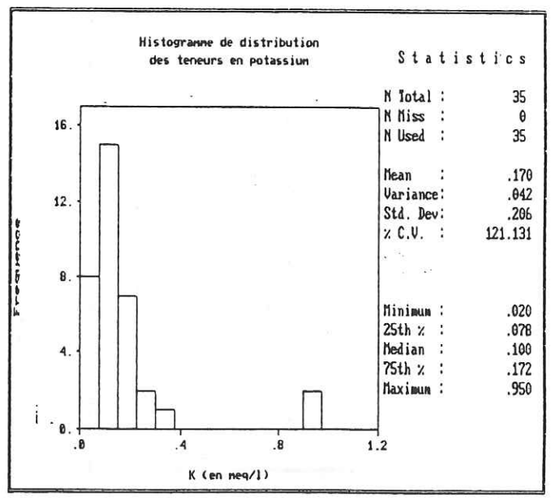
a/



b/



c/



d/

Figures A5.9a à A5.9d. - Histogramme de distribution des teneurs en cations.

Tableau A6.1. - Résultats d'analyses isotopiques des eaux souterraines du Grand Yaéré.

N°	Date	Type	Oxygène-18 (o/oo SMOW)	Deutérium (o/oo SMOW)	Tritium (en UT)
CAM 5	29/4/87	F	-4,75	-30,2	
CAM 6	29/4/87	F	-5,34	-36,2	
CAM 7	29/4/87	F	-4,80	-33,1	
CAM 10	29/4/87	P	-3,79	-23,4	
CAM 11	29/4/87	P	-4,71	-27,1	
CAM 51	22/6/90	F	-5,01	-31,7	1,9
CAM 52	22/6/90	P	-4,22	-29,5	23,0
CAM 53	22/6/90	F	-5,57	-36,6	0,7
CAM 54	22/6/90	P	-3,36	-17,3	22,8
CAM 55	22/6/90	P	-4,73	-29,1	6,4
CAM 56	22/6/90	F	-5,29	-33,6	0,2
CAM 57	22/6/90	P	-4,93	-31,1	2,6
CAM 58	22/6/90	P	-4,94	-32,7	0,5
CAM 59	22/6/90	P	-4,43	-31,7	1,0
CAM 60	22/6/90	F	-5,11	-36,4	0,3
CAM 61	22/6/90	P	-4,87	-33,6	0,6
CAM 62	22/6/90	P	0,13	-3,6	36,3
CAM 63	22/6/90	P	-0,51	-7,4	35,5
CAM 64	23/6/90	P	-4,12	-24,4	0,8
CAM 65	23/6/90	P	-3,59	-21,5	9,4
CAM 66	23/6/90	F	-4,73	-29,2	0,2
CAM 67	23/6/90	P	-4,29	-28,1	8,7
CAM 68	23/6/90	P	-2,94	-19,4	6,1
CAM 72	23/6/90	F	-4,14	-22,5	17,2
CAM 73	23/6/90	P	-3,71	-19,3	15,0
CAM 74	23/6/90	F	-4,84	-31,5	0,1
CAM 75	23/6/90	F	-5,00	-29,9	0,3
CAM 76	23/6/90	P	-4,19	-23,6	23,6
CAM 77	23/6/90	P	-4,56	-27,5	0,5
CAM 85	25/6/90	P	-6,03	-45,2	0,6
CAM 86	25/6/90	P	-3,77	-22,9	28,5
CAM 87	25/6/90	P	-5,12	-38,4	0,5
CAM 88	25/6/90	P	-4,35	-33,1	0,8
CAM 89	25/6/90	P	-4,48	-30,6	13,7
CAM 90	25/6/90	P	-2,80	-22,8	21,8
CAM 91	25/6/90	F	-2,36	-12,6	11,4
CAM 140	27/3/91	F	-4,38	-28,5	1,4
CAM 141	27/3/91	F	-4,69	-28,9	11,2
CAM 142	27/3/91	F	-4,32	-27,5	
CAM 143	27/3/91	F	-4,69	-27,7	0,3
CAM 144	27/3/91	F	-5,57	-36,5	0,4
CAM 145	27/3/91	F	-4,02	-27,3	
CAM 147	27/3/91	P	-2,91	-19,1	48,9
CAM 149	27/3/91	P	-0,26	-6,5	
CAM 150	27/3/91	P	0,37	-4,0	
CAM 151	27/3/91	F	-4,64	-33,6	0,4
CAM 152	28/3/91	P	-2,53	-11,8	
CAM 153	28/3/91	F	-3,27	-20,1	
CAM 154	28/3/91	F	-4,65	-31,8	
CAM 155	28/3/91	F	-3,10	-15,8	
CAM 156	28/3/91	F	-2,75	-14,1	20,7
CAM 157	28/3/91	F	-3,76	-22,9	12,9
CAM 158	29/3/91	F	-5,20	-31,5	7,5
CAM 159	29/3/91	F	-4,32	-30,8	
CAM 160	29/3/91	F	-4,02	-24,5	
CAM 161	29/3/91	F	-4,54	-29,4	0,1
CAM 163	29/3/91	F	-4,36	-29,7	1,1
CAM 164	29/3/91	F	-4,26	-28,7	1,1
CAM 165	29/3/91	F	-3,23	-18,0	15,1
CAM 166	30/3/91	F	-4,82	-31,5	
CAM 167	30/3/91	P	-3,68	-25,2	

N°	Date	Type	Oxygène-18 (o/oo SMOW)	Deutérium (o/oo SMOW)	Tritium (en UT)
CAM 15	28/10/89	P	-3,63	-20,6	
CAM 16	28/10/89	P	-4,85	-30,2	
CAM 17	28/10/89	P	-4,01	-22,2	
CAM 18	28/10/89	F	-4,89	-30,6	
CAM 19	28/10/89	F	-4,98	-29,9	0,1
CAM 20	28/10/89	P	-4,02	-23,4	16,3
CAM 21	28/10/89	F	-3,86	-22,7	17,0
CAM 31	30/10/89	F	-4,98	-31,9	1,8
CAM 32	30/10/89	P	-4,33	-29,6	28,8
CAM 33	30/10/89	F	-5,45	-34,7	0,1
CAM 34	30/10/89	P	-3,85	-21,6	
CAM 35	30/10/89	F	-5,11	-31,6	0,0
CAM 36	30/10/89	P	-5,35	-35,3	
CAM 37	30/10/89	P	-5,00	-33,0	2,6
CAM 38	30/10/89	P	-4,93	-31,7	0,1
CAM 39	30/10/89	P	-4,91	-33,9	0,2
CAM 40	31/10/89	F	-4,77	-30,6	0,3
CAM 41	31/10/89	P	-3,88	-19,9	
CAM 42	31/10/89	F	-4,73	-27,1	2,3
CAM 43	31/10/89	P	-4,59	-29,0	1,0
CAM 44	31/10/89	P	-3,73	-23,0	30,3
CAM 45	31/10/89	P	-6,06	-46,3	0,8
CAM 46	31/10/89	P	-3,53	-21,7	23,9
CAM 47	31/10/89	P	-4,63	-30,3	12,6
CAM 48	31/10/89	P	-4,28	-31,1	0,4
CAM 49	31/10/89	P	-5,17	-39,6	0,4
CAM 50	31/10/89	F	-2,40	-14,1	11,9
CAM 94	31/10/89	F	-2,54	-25,5	4,1
CAM 97	31/10/89	P	-3,57	-25,3	2,7
CAM 99	31/10/89	P	-4,36	-28,0	5,3
CAM 100	31/10/89	P	0,77	-3,6	
CAM 101	31/10/89	P	-0,21	-7,2	
CAM 102	31/10/89	F	-4,84	-37,1	
CAM 116	05/10/90	F	-4,19	-29,4	0,3
CAM 117	05/10/90	F	-4,85	-32,9	0,0
CAM 118	05/10/90	P	-3,27	-25,0	8,7
CAM 119	05/10/90	F	-4,09	-26,0	4,6
CAM 120	05/10/90	P	-1,79	-16,8	4,6
CAM 123	07/10/90	P	-2,89	-20,1	30,9
CAM 125	07/10/90	P	-4,91	-42,0	0,5
CAM 130	07/10/90	P	-2,81	-21,4	32,7
CAM 132	07/10/90	F	-4,13	-30,1	0,1
CAM 134	07/10/90	F	-3,36	-27,8	1,8
CAM 137	07/10/90	F	-3,52	-23,6	11,1

Tableau A6.2.

N'Djamena (1) -Valeurs mesurées ou déduites par corrélation avec Ottawa (d'après **AIEA**, 1981).
N'Djamena (2) - Valeurs dans N'Djamena (1) rapportées en 1988 par la décroissance radioactive (d'après **Onugba**, 1990)
N'Djamena (3) - Valeurs reconstituées en 1986 par décroissance radioactive à partir des données de Bamako (d'après **BRGM** et **Aquater**, 1986 in **Mbonu**, 1991)

Année	N'Djamena (1)	N'Djamena (2)	N'Djamena (3)
1953	30,5	4,4	3,6
1954	155,6	24,1	24,0
1955	37,7	6,1	5,2
1956	74,5	18,3	17,9
1957	74,5	13,7	12,9
1958	299,7	58,0	58,8
1959	234,6	48,0	48,5
1960	92,9	20,0	19,4
1961	127,0	29,0	28,6
1962	494,2	120,0	122,6
1963	1409,9	330,1	312,2
1964	753,6	203,8	217,9
1965	389,6	108,0	102,1
1966	293,9	86,1	61,5
1967	156,1	48,4	45,7
1968	123,8	40,6	38,3
1969	161,5	55,9	52,8
1970	114,1	41,8	38,7
1971	150,0	58,1	54,9
1972	91,4	37,4	35,3
1973	41,5	18,0	17,0
1974	55,4	25,4	24,0
1975	52,2	25,2	23,8
1976	41,6	24,3	26,7
1977	36,2	19,6	18,5
1978	40,6	31,3	21,9
1979	41,7	25,9	27,1
1980	41,6	27,3	39,1
1981	47,7	33,2	27,8
1982		22,1	15,2
1983		30,4	10,6
1984			6,7
1985			4,0

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.

Liste des figures.

Chapitre 1.

Figure 1.1. - Situation du Grand Yaéré dans le bassin tchadien et dans l'Extrême-Nord du Cameroun.

Figure 1.2. - Carte de localisation des principales unités morphologiques du Grand Yaéré.

Figure 1.3. - Carte de situation des cordons dunaires de la cuvette tchadienne (d'après **CBLT/PNUD/UNESCO** 1969, simplifié).

Figure 1.4. - Tableau synoptique de l'histoire géologique du Grand Yaéré (**Ngounou Ngatcha B.**, 1993).

Figure 1.5. - Carte géologique du secteur Sud du Grand Yaéré (d'après **Dumort** et **Peronne** 1966, simplifié).

Figure 1.6. - Carte de localisation des massifs anorogéniques suivant la "ligne du Cameroun" (d'après **Ghogomu R.; Moreau C.; Brown W. L.** et **Rocci G.**, 1989).

Figure 1.7. - Coupe schématique du bassin du Tchad (d'après **Schneider**, 1970 in **Guiraud R.**, 1988).

Figure 1.8. - Coupe géologique dans les sédiments quaternaires du Nord Cameroun (d'après **GEOHYDRAULIQUE**, 1986).

Figure 1.9 - Coupes géologiques à travers le Quaternaire du Grand Yaéré (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Figure 1.10. - Structures tectoniques majeures au Sud du lac Tchad
(inspiré des travaux de **Louis**, 1970; **Bessoles** et **Trompette**, 1980).

Figure 1.11. - Coupe schématique de localisation du fossé de NGODENI (**Ngounou Ngatcha B.**, 1993).

Chapitre 2.

Figure 2.1. - Variations de la position du Front Intertropical au voisinage du Cameroun (in **Martin D.** et **Segalin P.**, 1966).

Figure 2.2. - Esquisse des isohyètes interannuelles du Nord Cameroun (période 1976-1985 in **Djeuda**, 1987).

Figure 2.3. - Evolution de la chronique des précipitations sur les principales stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Figure 2.4. - Histogramme de distribution des précipitations moyennes mensuelles sur les principales stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Figure 2.5. - Histogramme de distribution des températures moyennes mensuelles sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Figure 2.6. - Histogramme de distribution de l'évaporation moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1987-1991).

Figure 2.7. - Histogramme de distribution de l'humidité relative moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Figure 2.8. - Histogramme de distribution de l'insolation moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1988-1991).

Figure 2.9. - Esquisse hydrographique de l'Extrême-Nord du Cameroun.

Figure 2.10. - Bassin du Tsanaga (d'après **Olivry**, 1986).

Figure 2.11. - Situation géographique de la retenue de Maga (d'après **SOGREAH** 1979, modifié).

Figure 2.12. - Schéma de mécanisme de fonctionnement hydrologique du Grand Yaéré (schéma de **Naah**, 1990 complété par les données de **Olivry**, 1986)

Chapitre 3.

Figure 3.1. - Les grandes unités hydrogéologiques de l'Extrême-Nord du Cameroun (d'après **Tillement**, 1970; **Detay**, 1987).

Figure 3.2. - Coupes géologiques à travers la plaine de piémont
(d'après **Tillement**, 1970).

Figure 3.3. - Schéma et Coupe de localisation des nappes perchées dans le Grand Yaéré (**Ngounou Ngatcha B.**, 1990).

Figure 3.4. - Relation hydraulique entre les nappes sous-fluviales et le système aquifère du piémont (**Ngounou Ngatcha B**, 1993).

Figure 3.5. - Diagramme schématique du système aquifère du piémont (**Ngounou Ngatcha B**, 1993).

Figure 3.6. - Diagramme schématique du système aquifère alluvionnaire du Quaternaire des Yaérés (**Ngounou Ngatcha B**, 1993).

Chapitre 4.

Figure 4.1. - Carte topographique en courbes de niveau représentant la surface du sol dans le périmètre choisi.

Figure 4.2. - Carte en courbes isohypses de la surface du mur des aquifères du Quaternaire.

Figure 4.3. - Carte en courbes isobathes de la profondeur des aquifères du Quaternaire.

Figure 4.4. Histogramme de distribution de la profondeur des aquifères du Quaternaire.

Figure 4.5. - Carte en courbes isopaches de l'épaisseur des aquifères du Quaternaire.

Figure 4.6. Histogramme de distribution de l'épaisseur des aquifères du Quaternaire.

Figure 4.7. - Carte en courbes isohypses de la morphologie de la surface piézométrique moyenne des nappes des alluvions du Quaternaire.

Figure 4.8. - Coupe géologique dans les sédiments quaternaires du périmètre étudié (**Ngounou Ngatcha B.**, 1993).

Figure 4.9. - Histogramme de distribution des débits de pompage des aquifères du Quaternaire.

Figure 4.10. - Histogramme de distribution des débits spécifiques des aquifères du Quaternaire.

Figure 4.11. - Carte d'isovaleurs des débits spécifiques des nappes du Quaternaire.

Figure 4.12. - Histogramme de distribution des transmissivités des aquifères du Quaternaire.

Figure 4.13. - Carte d'isovaleurs des transmissivités (et sa valeur en 10^{-4} m^2/s) des aquifères du Quaternaire.

Figure 4.14. - Relation transmissivité/débits spécifique.

Chapitre 5.

Figure 5.1. - Carte de présentation des localités de prélèvement des eaux souterraines pour l'analyse chimique.

Figure 5.2. - Histogramme de distribution des pH des eaux souterraines.

Figure 5.3. - Carte d'isovaleurs du pH des eaux souterraines.

Figure 5.4. - Histogramme de distribution des températures des eaux souterraines.

Figure 5.5. - Carte d'isovaleurs de la température des eaux souterraines.

Figure 5.6. - Histogramme de distribution des conductivités des eaux souterraines.

Figure 5.7. - Carte d'isovaleurs de la conductivité des eaux souterraines.

Figure 5.8. - Diagramme (Piper) d'analyse chimique des eaux souterraines.

Figure 5.9. - Diagramme Schoeller-Berkaloff de synthèse des analyses chimiques des eaux souterraines.

Figure 5.10. - Carte de répartition géographique des faciès chimiques.

Figure 5.11. - Relation conductivité/minéralisation totale des eaux souterraines.

Figure 5.12. - Relation conductivité/bicarbonate des eaux souterraines.

Figures 5.13a à 5.13d. - Relation entre les ions Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+}, K^{+} et les ions HCO_3^{-} (en méq/l).

Figures 5.14a à 5.14c. - Relation entre les ions Cl^{-}, SO_4^{--} , NO_3^{-} et les ions HCO_3^{-} (en méq/l).

Figure 5.14d. - Relation entre Ca^{++} et SO_4^{--} (en méq/l).

Figures 5.15a et 5.15b. - Cartes d'équirapports Mg/Ca.
a) - Niveaux aquifères superficiels.
b) - Niveaux aquifères indifférenciés.

Figure 5.16. - Carte d'équirapports Na/Ca.

Chapitre 6.

Figure 6.1. - Variations des teneurs en oxygène-18 et en deutérium dans les eaux de surface, eaux souterraines et vapeurs d'eaux en fonction des distances d'éloignement de la mer en Afrique de l'Ouest (d'après **Biemi**, 1992).

Figure 6.2. - Relation ^{18}O-^{2}H dans les précipitations et les eaux de surface (d'après **Craig**, 1961a in **Onugba**, 1990).

Figure 6.3. - Variations de la composition isotopique, hydrogramme et débit d'isotopes du Logone à Kousséri et Chari à Chagoua et N'Djamena (d'après **Fontes** et al, 1970 complété).

Figure 6.4. - Carte de localisation des points de prélèvement.

Figure 6.5. - Relation deutérium (octobre 1989)/deutérium (juin 1990) des eaux souterraines.

Figure 6.6. - Relation oxygène-18 (octobre 1989)/oxygène-18 (juin 1990) des eaux souterraines.

Figure 6.7. - Carte de répartition géographique en courbes isovaleurs de la composition moyenne en oxygène-18 des eaux souterraines dans le périmètre étudié.

Figure 6.8. - Histogramme de distribution des teneurs en oxygène-18 des eaux souterraines du piémont.

Figure 6.9. - Histogramme de distribution des teneurs en deutérium des eaux souterraines du piémont.

Figure 6.10. - Histogramme de distribution des teneurs en oxygène-18 des eaux souterraines des Yaérés.

Figure 6.11. - Histogramme de distribution des teneurs en deutérium des eaux souterraines des Yaérés.

Figure 6.12. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux du système aquifère du piémont.

Figure 6.13. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux du système aquifère
du Quaternaire des Yaérés.

Figure 6.14. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux des niveaux superficiels des Yaérés et des eaux de surface (cours d'eau et mares).

Figure 6.15. - Histogramme de distribution des teneurs en tritium des eaux souterraines du piémont.

Figure 6.16. - Carte de répartition géographique en courbes isovaleurs des teneurs en tritium des eaux souterraines dans le périmètre étudié.

Figure 6.17. - Histogramme de distribution des teneurs en tritium des eaux souterraines des Yaérés.

Figure 6.18. - Coupe interprétative des faciès chimiques et des teneurs en isotopes des aquifères du Quaternaire du Grand Yaéré.

Figure 6.19. - Chronique des teneurs en tritium dans les pluies à N'Djamena (1953-1985).

Figure 6.20. - Schéma de circulations souterraines dans les aquifères du Quaternaires du Grand Yaéré.

Chapitre 7.

Figure 7.1. - Coupe géologique et hydrogéologique le long du cordon sableux de Limani à Kilissawa (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Figure 7.2. - Coupe géologique transverse au cordon (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Figure 7.3. - Carte de situation des anomalies piézométriques et de localisation des points de prélèvement.

Figure 7.4. - Nappe du Trarza (d'après **Elouard P.** in **Archambault**, 1987 complété).

Figure 7.5. - Nappe du Gondo au Mali (d'après **Palausi G** et **Defossez M.**, in **Archambault**, 1987 complété).

Figure 7.6. - Carte montrant la distribution géographique des teneurs en tritium des eaux souterraines "indifférentiées" suivant plusieurs axes dans la zone dite déprimée.

Figure 7.7. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines "indifférentiées" dans la zone dite déprimée.

Figure 7.8. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines des niveaux aquifères superficiels dans la zone dite déprimée.

Figure 7.9. - Relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines des niveaux aquifères profonds dans la zone dite déprimée.

Figure 7.10. - Relation oxygène-18/niveau statique dans la zone dite déprimée.

Figure 7.11. - Relation conductivité/chlorure dans quelques points d'eau de la zone dite déprimée.

Figure 7.12. - Coupe schématique de localisation des niveaux aquifères, de distribution des faciès chimiques et des teneurs en isotopes dans la zone dite déprimée (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Chapitre 8.

Figure 8.1. - Réserves et ressources des aquifères à nappe libre.

Figure 8.2. - Histogramme de distribution de l'évapotranspiration potentielle (Serra et Thornthwaite) moyenne mensuelle à la station de Maroua-Salak (1980-1989).

Figure 8.3. - Schéma de synthèse des différents cas du calcul du bilan hydrique de Thornthwaite à la station de Maroua-Salak (inspiré de **Mégnien**, 1979).

Figure 8.4. - Exemple de carte des conditions aux limites latérales géologiques et hydrodynamiques pour la modélisation hydrogéologique des aquifères du Grand Yaéré (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Chapitre 9.

Figure 9.1. - Pollution d'une nappe par recyclage des eaux du bac d'abreuvage des animaux (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Figure 9.2. - Schéma de localisation des sources de pollution de la nappe sous-fluviale et la nappe du piémont dans le centre ville de Maroua (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Figure 9.3. - Schéma montrant le mouvement d'éléments polluants de la ville de Maroua vers la nappe sous-fluviale et la nappe du piémont (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Figure 9.4. - Schéma d'enrichissement en nitrates de la nappe à partir du cordon (**Ngounou Ngatcha**, 1993).

Liste des tableaux.

Chapitre 2.

Tableau 2.1. - Précipitations moyennes annuelles sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Tableau 2.2. - Précipitations moyennes mensuelles sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Tableau 2.3. - Températures moyennes mensuelles sur les stations du Grand Yaéré (1985-1991).

Tableau 2.4. - Evaporation "Piche" moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1987-1991).

Tableau 2.5. - Humidités relatives moyennes mensuelles sur les stations de Maroua-Salak et de Mokolo (1985-1991).

Tableau 2.6. - Insolation moyenne mensuelle sur les stations du Grand Yaéré (1988-1991).

Tableau 2.7. - Caractéristiques morphologiques et hydrologiques des principaux mayos du Grand Yaéré.

Chapitre 3.

Tableau 3.1. - Classification des nappes du Grand Yaéré (**Ngounou Ngatcha B.**, 1993).

Chapitre 4.

Tableaux 4.1a. - Caractéristiques hydrauliques des ouvrages de captage.

Tableaux 4.1b. - Caractéristiques hydrauliques des ouvrages de captage.

Tableau 4.2. - Valeurs de perméabilité des aquifères du Quaternaire.

Chapitre 5.

Tableau 5.1. - Regroupement des points d'eau par bassin et suivant le faciès chimique.

Tableau 5.2. - Rapports caractéristiques des eaux souterraines du périmètre étudié.

Tableau 5.3. - Résultats des indices d'échange de bases.

Tableau 5.4. - Caractéristiques analytiques des vertisols nodaux (d'après **Seyni-Boukar**, 1990).

Chapitre 6.

Tableau 6.1. - Relation ^{18}O et ^{2}H dans les eaux météoriques, les eaux de surface et les eaux souterraines de quelques régions d'Afrique.

Tableau 6.2. - Composition isotopique de quelques cours d'eau et mares du Grand Yaéré.

Chapitre 7.

Tableau 7.1. - Caractéristiques hydrauliques de quelques forages situés sur le cordon sableux.

Tableau 7.2. - Données isotopiques dans la zone dite déprimée du Grand Yaéré.

Tableau 7.3. - Profondeur constatée du niveau statique sur des forages en zone soudano-sahélienne (d'après **SOGREAH**, 1990).

Tableau 7.4. - Niveaux statiques dans quelques puits situés dans la zone dite déprimée du Grand Yaéré.

Chapitre 8.

Tableau 8.1. - Evapotranspiration potentielle moyenne mensuelle et annuelle d'après la formule de Thornthwaite et de Serra à la station de Maroua-Salak .

Tableau 8.2. - Bilan de l'eau d'après les moyennes mensuelles de l'évapotranspiration potentielle (Serra et Thornthwaite) et des précipitations à la station de Maroua-Salak (1980-1989).

Tableau 8.3. - Bilan intermédiaire établi d'après la moyenne des résultats des formules Serra et Thornthwaite(1980-1989).

Chapitre 9.

Tableau 9.1. Teneurs en nitrate des eaux de surface et des eaux souterraines de quelques ouvrages du Grand Yaéré.

Annexe 1.

Planche A. Situation des axes de coupe

Annexe 2.

Figure A4.1. - Relation transmissivité/débits spécifique en coordonnées logarithmiques.

Tableau A4.1a - Caractéristiques géométriques et hydrauliques des ouvrages de captage.

Tableau A4.1b - Caractéristiques géométriques et hydrauliques des ouvrages de captage.

Annexe 3.

Figure A 5.1 à A5.7. - Diagrammes (Schoeller-Berkaloff) d'analyse chimique des eaux souterraines.

Figure A5.8. - Histogrammes de distribution des teneurs en anions.

Figure A5.9. - Histogramme de distribution des teneurs en cations.

Tableau A5.1a - Résultats des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

Tableau A5.1b - Résultats des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

Tableau A5.2a. - Résultats d'analyse chimique exprimés en milligramme par litre.

Tableau A5.2b. - Résultats d'analyse chimique exprimés en milliéquivalent par litre.

Tableau A5.2c. - Résultats d'analyse chimique exprimés en pourcent.

Annexe 4.

Tableau A6.1. - Résultats d'analyses isotopiques des eaux souterraines du Grand Yaéré.

Tableau A6.2.

N'Djamena (1) - Valeurs mesurées ou déduites par corrélation avec Ottawa (d'après **AIEA**, 1981).

N'Djamena (2) - Valeurs dans N'Djamena (1) rapportées en 1988 par la décroissance radioactive (d'après **Onugba**, 1990)

N'Djamena (3) - Valeurs reconstituées en 1986 par décroissance radioactive à partir des données de Bamako (d'après **BRGM** et **Aquater**, 1986 in **Mbonu**, 1991)

SIGLES, ABREVIATIONS et GLOSSAIRE.

SIGLES ET ABREVIATIONS.

A.E.P. - Alimentation en Eau Potable.
A.I.E.A. (I.A.E.A. en anglais) - Agence Internationale de l'Energie Atomique (Vienne).
B.E. - Bureau de l'Eau (Cameroun).
B.R.G.M. - Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France).
C.B.L.T. - Commission du Bassin du Lac Tchad (Tchad).
C.E.E. - Communauté Economique Européenne.
C.G.G. - Compagnie Générale de Géophysique (France).
C.I.E.H. - Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (Ouagadougou, Burkina-Faso).
C.O.R.P.E.N. - Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates (France).
C.R.D.I. - Centre de Recherches pour le Développement International (Canada).
C.R.H. - Centre de Recherches Hydrologiques (Cameroun).
D.G.R.H.A. - Direction du Génie Rural et de l'Hydraulique Agricole (Cameroun).
D.M.G. - Direction des Mines et de la Géologie (Cameroun).
D.M.N. - Direction de la Météorologie Nationale (Cameroun).
F.A.O. - Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.
F.N.U.A.P. - Fonds des Nations Unies pour les Activités en matière de Population.
F.S.A.R. - Fonds Spécial d'Action Rurale (Cameroun).
FO.NA.DE.R. - Fonds National de Développement Rural (Cameroun).
FO.RA.CO. - Forage Rationnel Construction (Cameroun).
GEO-EAS - Geostatistical Environmental Assessment Software (USA).
I.F.A.N. - Institut Fondamental d'Afrique Noire (Sénégal).
I.R.G.M. - Institut de Recherches Géologiques et Minières (Cameroun).
I.R.T.I.S.S. - Institut de Recherches sur les Techniques l'Industrie et le Sous-Sol (Cameroun).
I.S.T. - Institut des Sciences de la Terre (Sénégal).
L.H.G.I. - Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopiques (Centre Orsay, France).
MIN.AGRI. - Ministère de l'Agriculture (Cameroun).
M.E.S.RE.S. - Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (Cameroun).
MIN.M.E.E. - Ministère des Mines de l'Eau et de l'Energie (Cameroun).
M.R.H. - Mission de Recherches Hydrologiques (Cameroun).
O.M.S. - Organisation Mondiale de la Santé.
O.NA.RE.S.T. - Office National de la Recherche Scientifique et Technique (Cameroun).
O.R.S.T.O.M. - Institut français pour la recherche scientifique et le développement en coopération (France).
P.E.S. - Projet Eau Souterraine (Cameroun).
P.I.C.G. - Programme International de Corrélation Géologique (UNESCO).

P.N.U.D. (U.N.D.P. en anglais) - Programme des Nations Unies pour le Développement (New York).

S.D.A.D. - Service départemental de l'agriculture du Diamaré (Cameroun).

S.E.D.A. - Société d'Etude pour le Développement de l'Afrique (Cameroun).

S.G.R.H.P.V. - Service du génie rural chargé de l'hydraulique pastorale et villageoise (Cameroun).

S.H. - Service Hydrogéologique (Cameroun).

S.P.E.A.P.A.EN. - Service provincial des enquêtes agro-économiques et de la planification agricole de l'Extrême-Nord (Cameroun).

U.N.E.S.C.O. - United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (Paris).

GLOSSAIRE.

(Nous déffinissons ici, si ce n'est pas déjà fait dans le texte, quelques termes locaux d'usage courant pouvant paraître obscurs).

Alluvions. D'après **Schoeller** (1962), les alluvions sont des roches poreuses, de nature complexe. Ce sont tantôt des galets et des sables à grande porosité et grande perméabilité, tantôt des sables fins plus ou moins argileux, à perméabilité restreinte, tantôt des limons poreux mais à faible vitesse de circulation, tantôt des argiles imperméables.

Bassin des Iullemmeden. Terme crée par **Radier** en 1931 par référence à une tribu Touareg de ce nom. Il recouvre la partie occidentale de la République du Niger et s'étend également sur les territoires du Mali, du Benin et du Nigéria.

Bassin sédimentaire tchadien. Vaste cuvette endoréique d'environ 2 millions et demi de Km² de superficie. Il est situé au coeur du continent africain entre 8° et 22° de latitude Nord et couvre les territoires du Cameroun, du Niger, du Nigéria et du Tchad.

B.P.(ex. 15000 ans BP) "Before Present" avant l'actuel, avec 1950 comme année de référence.

Continental terminal. Expression utilisée pour la première fois par **Conrad Kilian** en 1931 pour désigner des dépôts continentaux Oligo-Mio-Plicène dans le Sahara algérien.

Extrême-Nord (Province). Une des dix provinces que compte le Cameroun. Elle regroupe six départements notamment : le Logone et Chari, le Mayo Danay, le Mayo Sava, le Mayo Tsanaga, le Diamaré et le Kaélé sur une superficie de 34260 Km².

Ghazalien. Terme introduit par **Servant** en 1973 pour désigner un épisode lacustre s'étendant de 40000 à 20000 ans BP environs.

Hosséré. Terme peulh désignant les montagnes.

Hydraulique (Campagne ou projet). Programme consistant en la création dans les villes (faibles importances) et dans les villages, de forages et/ou puits équipés de pompes à motricité humaine.

Karral. Terme peulh désignant les argiles noires de surface.

Lac Tchad. Dépression fermée de 10000 à 25000 Km² dépourvue d'exutoire superficiel. Il est situé vers 282 m d'altitude et sa profondeur moyenne est de l'ordre de 3 à 5 mètres.

Lamido. Chef de village dans les localités du Nord Cameroun.

Le Panafricain. Kennedy (1964) et **Rocci** (1965) définissent le Panafricain comme l'évènement thermotectonique majeur estimé aux environs de 500 MA et entourant les cratons anciens stables de l'ouest africain, du Congo et du Kalahari.

Ligne du Cameroun. Ligne de plus de 2000 Km qui résulte d'un réseau d'accidents dont la direction majeure est orientée SW-NE. Cette ligne est jalonnée de roches plutoniques et de roches volcaniques depuis les îles Annobon, Sao Thomé, Principe et Fernando Pô dans l'océan atlantique jusque dans les monts (Kapsiki, Mandara).

Mayo. Terme peulh désignant les rivières torrentielles et temporaires.

Nappes en creux. Terme utilisé par **J. ARCHAMBALT** en 1960 pour désigner les anomalies majeures, très répendues en Afrique subsaharienne, se traduisant par des dépressions pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres au dessus du niveau normal, ou latéral, de la nappe.

Nord Cameroun. Domaine régional qui s'étend depuis le front septentrional du plateau de l'Adamaoua jusqu'à la bordure du lac Tchad (ancienne grande province septentrionale du Cameroun).

Yaéré. Terme peulh désignant les vastes plaines inondables du Nord Cameroun.

TABLE DES MATIERES

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
15, RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TÉL. (33) 76 63 59 66
FAX. (33) 76 87 82 43

TABLE DES MATIERES.

Avant-propos 5
Résumé/abstract 11

INTRODUCTION GENERALE.

i) - Problématique 16
ii) - Objectif et Contenu de l'étude 18

Première partie : **LES CARACTERISTIQUES GENERALES DU GRAND YAERE.**

Chapitre 1.
SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CADRE GEOLOGIQUE DE L'ETUDE.

1.1. Aperçu géographique et géomorphologique 26
1.1.1. Situation géographique 26
1.1.2. Aspect morphologique 28
1.1.2.1. La plaine de piémont 28
1.1.2.2. La plaine des Yaérés 30
1.1.2.3. Les systèmes dunaires 30
1.2. Contexte géologique 31
1.2.1. Aperçu de l'histoire Géologique 32
1.2.2. Les roches du substratum 34
1.2.2.1. Les formations anté-panafricaines : les migmatites 34
1.2.2.2. Les formations panafricaines et post-panafricaines 34
1.2.3. Les terrains du Cénozoïque 38
1.2.3.1. Approche critique sur la définition du Continental terminal 38
1.2.3.2. L'Oligo-Miocène 41
1.2.3.3. Le Pliocène 41
1.2.4. Les terrains du Quaternaire 42
1.2.4.1. Le Quaternaire ancien 42
1.2.4.2. Le Quaternaire récent 45
1.2.5. Cadre structural 46
1.2.5.1. Les directions structurales 46
1.2.5.2. Le fossé d'effondrement de NGODENI 48
1.3. Conclusion 50

Chapitre 2.
CADRE HYDROCLIMATIQUE.

2.1. Introduction 54
2.2. Les conditions climatiques 54
2.3. Les principaux paramètres du climat 55
2.3.1. Situation géographique des stations 55
2.3.2. Les précipitations 56
2.3.2.1. Les précipitations annuelles 56
2.3.2.2. Les précipitations mensuelles 60
2.3.3. Les autres paramètres climatiques 61
2.3.3.1. La température 61
2.3.3.2. L'évaporation 62
2.3.3.3. L'humidité relative 64
2.3.3.4. L'insolation 65

2.4. Le réseau hydrographique et le régime des eaux de surface 68
2.4.1. Généralités 68
2.4.2. Les rivières saisonnières ou "mayos" 68
2.4.3. Le Logone inférieur 72
2.4.4. L'El Beïd 74
2.5. Les caractéristiques du bilan hydrologique 75
2.6. Conclusion 78

Chapitre 3.
CARACTERES GENERAUX DES AQUIFERES.

3.1. Introduction 82
3.2. Résultats des travaux antérieurs 82
3.2.1. Travaux de Schowoerer (1965), Lerici (1967), Biscaldi (1970), Tillement (1970), F.A.O. (1971), FORACO (1987) 82
3.2.2. Travaux de M. Detay (1987) 84
3.2.3. Approche et orientations nouvelles 87
3.3. Description des principales nappes 90
3.3.1. Le bassin hydrogéologique du piémont 90
3.3.1.1. Les nappes superficielles 90
3.3.1.2. Le système aquifère du piémont 92
3.3.1.3. Les nappes du socle 96
3.3.2. Le bassin hydrogéologique des Yaérés 98
3.3.2.1. Le système aquifère alluvionnaire du Quaternaire des Yaérés 98
3.3.2.2. Le système aquifère du Continental terminal 99
3.4. Conclusion 100

Deuxième partie : **ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES SYSTEMES AQUIFERES DU QUATERNAIRE DU GRAND YAERE.**

Chapitre 4.
STRUCTURE ET DYNAMIQUE DES NAPPES.

4.1. Introduction 106
4.2. Inventaire des points d'eau réalisés dans le Grand Yaéré 106
4.3. Présentation du périmètre choisi 110
4.4. Structure des aquifères 112
4.4.1. Carte de la surface du mur des aquifères 112
4.4.2. Carte de la profondeur des aquifères 114
4.4.3. Carte de l'épaisseur des aquifères 116
4.4.4. Conclusion 118
4.5. Piézométrie des nappes 118
4.5.1. Introduction 118
4.5.2. Carte de la morphologie de la surface piézométrique des nappes 120
4.5.3. Evolution de la piézométrie depuis 1970 123
4.5.4. Conclusion 124
4.6. Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères 126
4.6.1. Les pompages d'essais : méthodes d'interprétations
4.6.1.1. Méthode de Theis-Jacob 126
4.6.1.2. Méthode de Thiem 128
4.6.1.3. Conclusion 129
4.6.2. Les débits de pompage des forages 130

4.6.3. Les débits spécifiques et les transmissivités 132
4.6.3.1. Répartion géographique des paramètres 132
4.6.3.2. Corrélation transmissivité/débit spécifique 136
4.6.4. Détermination de la perméabilité 138
4.7. Conclusion 140

Chapitre 5.
CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES.

5.1. Introduction 144
5.2. Les paramètres physico-chimiques 146
5.2.1. Le pH 146
5.2.2. La température 148
5.2.3. La conductivité 149
5.3. Représentation graphique et classification des eaux souterraines 152
5.3.1. Représentation graphique des analyses 152
5.3.2. Classification chimique des eaux 155
5.4. Importance des éléments majeurs 158
5.4.1. Les anions 160
5.4.2. Les cations 164
5.5. Le rôle des argiles et l'échange de bases entre l'eau souterraine et le milieu aquifère 167
5.6. Conclusion 170

Chapitre 6.
CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES.

6.1. Introduction 174
6.2. Principes de base de l'hydrologie isotopique 174
6.2.1. Généralités 174
6.2.2. Les isotopes du milieu naturel 175
6.2.2.1. Les isotopes stables. Oxygène-18 et deutérium 175
6.2.2.2. Les isotopes radioactifs : le tritium 175
6.2.3. Les variations naturelles de la composition isotopique de l'eau 176
6.2.3.1. Le facteur de fractionnement 176
6.2.3.2. Marquage en isotopes stables au cours de la condensation 177
6.2.3.3. Marquage en isotopes stables au cours de l'évaporation 180
6.2.3.4. Les réactions d'échanges 181
6.2.4. Relation comparée ^{18}O-^{2}H dans les eaux naturelles 181
6.3. Présentation des résultats d'analyse des précipitations et des eaux de surface 184
6.3.1. Les eaux de pluie 184
6.3.2. Les eaux de surface : cours d'eau et mares 185
6.4. Interprétation des résultats d'analyse des eaux souterraines 188
6.4.1. Echantillonnage et analyses 188
6.4.2. Teneurs en isotopes lourds (^{18}O et ^{2}H). Origine et genèse des eaux souterraines du périmètre étudié 190
6.4.2.1. Evolution des teneurs en isotopes lourds dans le temps 190
6.4.2.2. Distribution des teneurs en isotopes lourds 190

6.4.2.3. Relation oxygène-18/deutérium 194
6.4.3. Tritium et approche des temps de séjour des eaux souterraines du périmètre étudié 198
6.4.3.1. Distribution des teneurs en tritium 198
6.4.3.2. Estimation des temps de séjour et de renouvellement des eaux souterraines 202
6.5. Conclusion 204

Troisième Partie : **ELEMENTS DE GESTION DES SYSTEMES AQUIFERES DU GRAND YAERE.**

Chapitre 7.
PROBLEME DU CORDON SABLEUX ET DES ANOMALIES PIEZOMETRIQUES.

7.1. Introduction 212
7.2. Problème du cordon sableux Limani-Yagoua 212
7.2.1. Structure du cordon sableux 212
7.2.2. Origine structurale des cordons sableux 214
7.2.3. Rôle hydraulique du cordon sableux 218
7.2.4. Conclusion 220
7.3. Problème des anomalies piézométriques 222
7.3.1. Généralités 222
7.3.2. Travaux antérieurs 224
7.3.3. Etudes isotopiques 228
7.3.3.1. Echantillonnage 228
7.3.3.2. Etude par le tritium 230
7.3.3.3. Etude par l'oxygène-18 et le deutérium 231
7.3.4. Les variations de niveaux d'eau 234
7.3.4.1. Généralités 234
7.3.4.2. Relation oxygène-18/niveaux statiques 236
7.3.5. Origine géologique : hypothèses explicatives 240
7.3.6. Conclusion 241

Chapitre 8.
EVALUATION DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES.

8.1. Ressources en eaux souterraines du périmètre étudié 244
8.1.1. Généralités 244
8.1.2. Ressources régulatrices en eaux souterraines 245
8.1.3. Réserves permanentes 246
8.1.4. Ressources exploitables en eaux souterraines 247
8.1.5. Evaluation des ressources en eaux souterraines renouvellables naturelles à partir des données hydrologiques 248
8.1.5.1. Calcul de l'évapotranspiration potentielle 248
8.1.5.2. Evaluation de la pluie efficace par la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite 251
8.1.6. Confrontation des résultats 254
8.2. Synthèse des connaissances hydrodynamiques par des méthodes de simulations numériques 255
8.2.1. Généralités 255
8.2.2. Résultats analytiques nécessaires pour la construction du modèle 256
8.2.3. Objectifs du modèle 260
8.3. Conclusion 261

Chapitre 9.
POSSIBILITES DE DEVELOPPEMENT DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES.

9.1. Introduction 266
9.2. Possibilités d'exploitation des nappes 266
9.2.1. Introduction 266
9.2.2. Exploitation du système aquifère du piémont 267
9.2.3. Exploitation du système aquifère alluvionnaire du Quaternaire des Yaérés 269
9.2.4. Conclusion 273
9.3. Vulnérabilité des nappes à la pollution 274
9.3.1. Introduction 274
9.3.2. Eaux souterraines et pollution superficielle 276
9.3.3. Moyens de de prévention et de protection des eaux souterraines contre la pollution 283
9.3.4. Conclusion 286

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.

Bibliographie 296

Annexes 306

Annexe 1. Planche A. Situation des axes de coupe des figures 1.9, 4.8, 7.1, 7.2 et 7.12, 308

Annexe 2. Caractéristiques géométriques et hydrauliques des ouvrages de captage 309

Annexe 3. Paramètres physico-chimiques, diagrammes d'analyses chimiques et histogrammes de distribution des teneurs en anions et cations 312

Annexe 4. Résultats d'analyses isotopiques et tableau de la chronique des teneurs en tritium des pluies à N'Djamena 326

Liste des figures et des tableaux 328

Sigles, abréviations et glossaire 340

Table des matières 346

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
15, RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TÉL. (33) 76 63 55 66
FAX. (33) 76 87 82 43

THESE de DOCTORAT
de l'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

Titre de l'ouvrage :

HYDROGEOLOGIE D'AQUIFERES COMPLEXES EN ZONE SEMI-ARIDE LES AQUIFERES QUATERNAIRES DU GRAND YAERE (NORD CAMEROUN)

Nom de l'auteur :

NGOUNOU NGATCHA Benjamin

Etablissement :

Laboratoire d'hydrogéologie
Institut Dolomieu

RESUME

Les aquifères quaternaires du Grand Yaéré ont fait l'objet de nouvelles investigations hydrogéologiques dont les résultats portent sur leurs redéfinitions et leurs fonctionnements.

L'identification géologique et hydrogéologique du milieu a révélé l'existence d'un aquifère de type monocouche dans le piémont et de type bicouche dans les Yaérés.

L'alimentation des aquifères du piémont à partir des précipitations et des eaux de surface est mise en évidence par l'étude piézométrique et confirmée respectivement par la composition isotopique et la chimie des eaux souterraines.

A l'exception des nappes perchées, la relation oxygène-18/deutérium des eaux souterraines dans les Yaérés montre que la recharge des nappes ne se fait pas par infiltration directe des précipitations. L'étude piézométrique complétée par la chimie et les isotopes suggère que l'infiltration dans les niveaux aquifères superficiels s'effectue dans les zones de stagnation des eaux de surface. Les teneurs en isotopes lourds des eaux profondes quant à elles témoignent une alimentation à partir des eaux du système aquifère du piémont et du cordon sableux.

Le cordon sableux Limani-Yagoua jadis considéré comme stérile, joue donc le rôle de régulateur dans la reconstitution des niveaux d'eau des nappes sous-jacentes.

Les études géologique et géochimique permettent clairement de mettre en cause l'existence d'anomalies piézométriques ou "nappes en creux", attribuées à l'effet d'évaporation, dans les Yaérés.

Sur la base des données hydrodynamiques et hydroclimatiques, l'ordre de grandeur des ressources et des réserves en eaux souterraines de la région a été défini.

L'exploitation des eaux souterraines est surtout pratiquée à partir des nappes alluviales superficielles. Les aquifères profonds constituent une solution envisageable dans des secteurs à nappes superficielles inextistantes ou peu importantes.

A la suite d'un bilan des connaissances sur les risques de pollution des eaux souterraines, un plan de prévention et de protection des nappes est proposé.

MOTS CLES

"Grand Yaéré" ; Aquifères quaternaires ; Monocouche (piémont) ; Bicouches (Yaérés) ; Cordon sableux ; Anomalies piézométriques ; Ressources et réserves en eaux ; Exploitation et pollution.