

Laboratoire d'Hydrologie  
ORSTOM  
MONTPELLIER

Laboratoire de Géochimie  
et d'Hydrologie Isotopique  
ORSAY

**UNIVERSITE PARIS SUD**

**ETUDE DES RELATIONS ENTRE LES AQUIFERES  
DU CONTINENTAL TERMINAL  
AU NORD DE NIAMEY (NIGER) :  
APPROCHE GEOLOGIQUE, GEOCHIMIQUE  
ET HYDRODYNAMIQUE.**

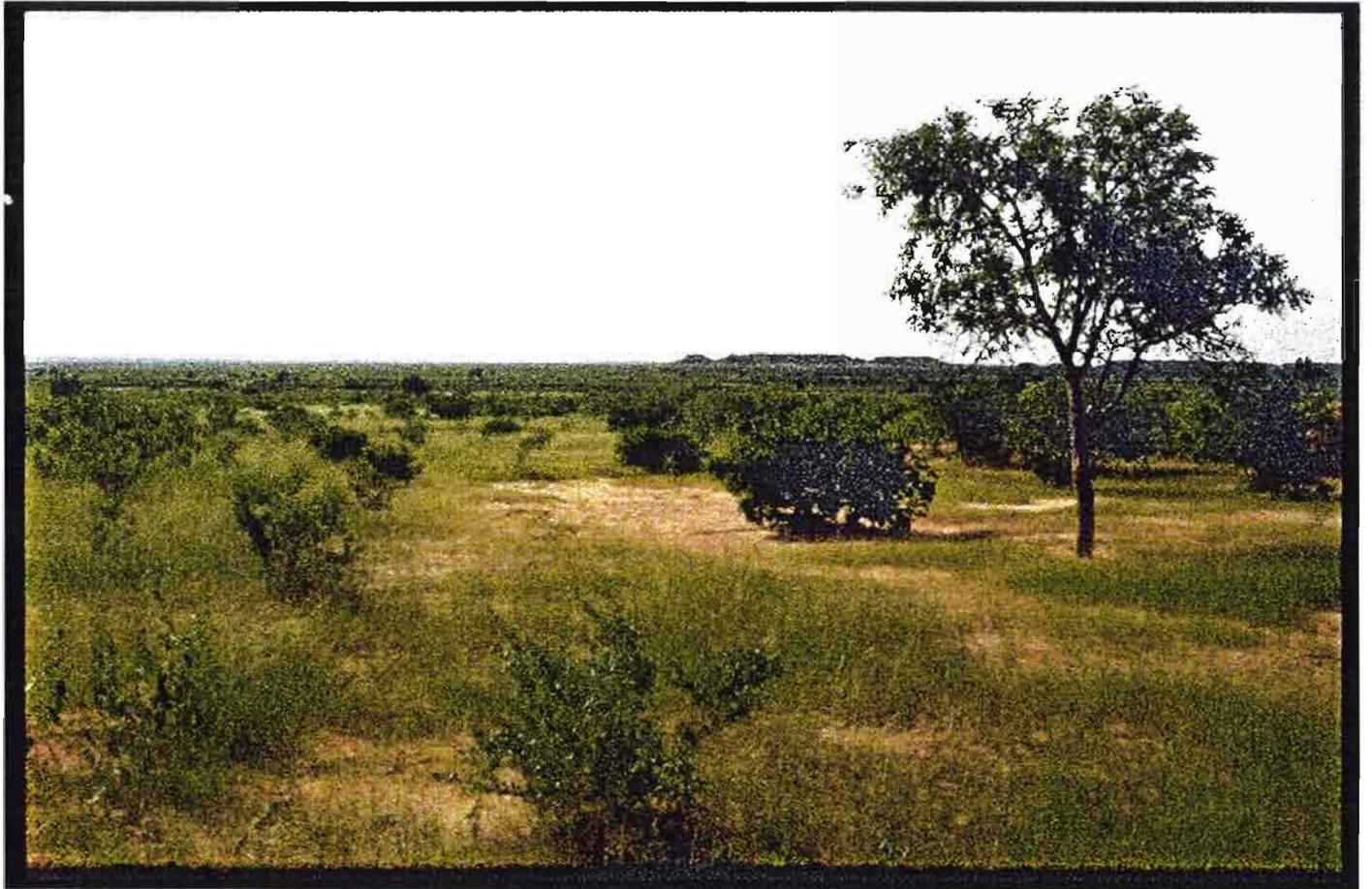
**PAR MAXIME MONFORT**

**DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES  
(D.E.A.)**

***HYDROLOGIE, HYDROGEOLOGIE, GEOCHIMIE et GEOSTATISTIQUES  
FILIERE HYDROCHIMIE & HYDROLOGIE ISOTOPIQUE***

Soutenu le 1<sup>er</sup> Juillet 1997 devant la commission d'examen







# SOMMAIRE

<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>9</b>
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>11</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>13</b>

## **CHAP. I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

<b>I-1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE</b> .....	<b>17</b>
I-1-1 LOCALISATION.....	17
I-1-2 CADRE CLIMATIQUE.....	17
<i>I-1-2-1 les précipitations</i> .....	17
<i>I-1-2-2 Les autres paramètres climatiques</i> .....	19
I-1-3 CADRE GEOMORPHOLOGIQUE ET VEGETATION.....	19
I-1-3 HYDROGRAPHIE.....	22
<b>I-2 GEOLOGIE</b> .....	<b>24</b>
I-2-1 LE BASSIN DES IULLEMEDEN AVANT LE CONTINENTAL TERMINAL.....	24
<i>I-2-1-1 Histoire géologique</i> .....	24
<i>I-2-1-2 Données structurales</i> .....	26
I-2-2 LE CONTINENTAL TERMINAL.....	26
<i>I-2-2-1 Définition du Continental Terminal</i> .....	26
<i>I-2-2-2 Dynamique de la sédimentation</i> .....	28
<i>I-2-2-3 Lithologie du Continental Terminal</i> .....	30
<b>I-3 HYDROGEOLOGIE DU CONTINENTAL TERMINAL</b> .....	<b>30</b>
I-3-1 BIBLIOGRAPHIE.....	30
I-3-2 PRESENTATION DES DIFFERENTS AQUIFERES.....	32
<i>I-3-2-1 Les sables inférieurs</i> .....	32
<i>I-3-2-2 Les sables moyens</i> .....	33
<i>I-3-2-3 Le système phréatique</i> .....	33
I-3-2 TERMINOLOGIE.....	35

## **CHAP. II : CARACTERISATION CHIMIQUE DES AQUIFERES**

<b>II-1 DONNEES DISPONIBLES</b> .....	<b>39</b>
II-1-1 ORIGINE DES DONNEES.....	39
II-1-2 CRITIQUE DES DONNEES.....	39
<i>III-1-2-1 Les prélèvements</i> .....	41
<i>II-1-2-1 Complémentarité des données chimiques et isotopiques</i> .....	41
<i>II-1-2-2 Identification des aquifères</i> .....	41
<b>II-2 ANALYSES STATISTIQUES</b> .....	<b>42</b>

II-2-1 PREMIERE CLASSIFICATION SUR LES PARAMETRES CHIMIQUES .....	42
II-2-2 SECONDE CLASSIFICATION SUR LES PARAMETRES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES .....	42
<b>II-3 CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES.....</b>	<b>44</b>
II-3-1 PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES .....	44
II-3-1-1 Conductivité.....	45
II-3-1-2 pH.....	45
II-3-1-3 Température.....	48
II-3-2 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX .....	48
II-3-2-1 Faciès hydrochimiques.....	48
II-3-2-2 Gamme de concentrations.....	52
II-3-2-3 Etat de saturation des eaux vis à vis des différents minéraux.....	54
<b>II-3 CARACTERISATION ISOTOPIQUE.....</b>	<b>57</b>
II-3-1 TENEURS ISOTOPIQUES.....	57
II-3-2 DIAGRAMME DES ELEMENTS CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES : RELATIONS ENTRE LES DIVERS AQUIFERES ? .....	63
II-3-2-1 Relation $\delta^2H$ vs $\delta^{18}O$ .....	63
II-3-2-2 Diagramme $Cl$ vs $\delta^{18}O$ .....	66
<b>II-4 CONCLUSION.....</b>	<b>68</b>

## **CHAP. III : RECONSTITUTION DE LA GEOLOGIE DES AQUIFERES**

<b>III-1 DONNEES DISPONIBLES ET INCERTITUDES .....</b>	<b>73</b>
III-1-1 DONNEES DISPONIBLES.....	73
III-1-2 INCERTITUDE SUR LES RESULTATS.....	74
III-1-2-1 Incertitude sur les altitudes.....	74
III-1-2-2 Distinction des formations.....	76
<b>III-2 ETUDE DES DIFFERENTS AQUIFERES .....</b>	<b>76</b>
III-2-1 LE SOCLE.....	77
III-2-1-1 Difficultés rencontrées.....	77
III-2-1-2 Le socle sain.....	77
III-2-1-2 Le socle altéré.....	77
III-2-2 LES SABLES INFERIEURS.....	80
III-2-2-1 Continuité.....	80
III-2-2-2 Extension latérale.....	80
III-2-2-3 Extension verticale.....	83
III-2-4 AQUIFERE DES OOLITHES.....	83
III-2-4-1 Lithologie et continuité.....	83
III-2-3-2 Extension latérale.....	88
III-2-3-2 Extension verticale.....	89
III-2-4 LA NAPPE PHREATIQUE.....	89
III-2-4-1 Extension latérale.....	89
III-2-4-2 Extension verticale.....	89
<b>III-3 RELATION GEOMETRIQUE ENTRE LES DIFFERENTS RESERVOIRS.....</b>	<b>91</b>
III-3-1 RELATION ENTRE LE SOCLE ET LES SABLES INFERIEURS.....	93
III-3-2 RELATION ENTRE LES SABLES INFERIEURS ET LES OOLITHES.....	93
III-3-3 RELATION ENTRE LES OOLITHES ET LA NAPPE PHREATIQUE.....	93
<b>III-4 CONCLUSION .....</b>	<b>97</b>

## **CHAP IV : ETUDE HYDRODYNAMIQUE**

<b>IV-1 CRITIQUE DES DONNEES .....</b>	<b>103</b>
IV-1-1 DONNEES DISPONIBLES .....	103
IV-1-2 INCERTITUDES .....	103
<i>IV-1-2-1 Sur l'estimation des altitudes .....</i>	<i>104</i>
<i>IV-1-2-2 Sur la validité des niveaux statiques .....</i>	<i>104</i>
<b>IV-2 PIEZOMETRIE RELEVÉE DANS LES PUITES.....</b>	<b>105</b>
IV-2-1 CHOIX DE LA CAMPAGNE DE MESURE .....	105
IV-2-2 RESULTATS .....	106
<i>IV-2-2-1 Description de la piézométrie .....</i>	<i>106</i>
<i>IV-2-2-2 La dépression nord-ouest.....</i>	<i>106</i>
<i>IV-2-2-3 La dépression sud.....</i>	<i>108</i>
<i>IV-2-2-4 La dépression locale de Kokire.....</i>	<i>109</i>
<b>IV-3 PIEZOMETRIE DES NAPPES PROFONDES .....</b>	<b>110</b>
<b>IV-4 CONCLUSION .....</b>	<b>112</b>
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>113</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>119</b>



## LISTE DES FIGURES

<b>fig. I-1</b> : Situation générale et localisation de la zone d'étude.....	<b>18</b>
<b>fig. I-2</b> : Hyétogramme mensuel de 1991 à Niamey-Ville rapporté au hyétogramme moyen de la période 1950-1989.....	<b>20</b>
<b>fig. I-3</b> : Chronique des totaux pluviométriques annuels à Niamey-ville de 1905 à 1990.....	<b>20</b>
<b>fig. I-4</b> : Répartition de la pluviométrie sur le degré carré de Niamey de 1990 à 1995.....	<b>21</b>
<b>fig. I-5</b> : Toposéquence représentative du paysage du degré carré de Niamey.....	<b>23</b>
<b>fig. I-6</b> : Géologie du bassin des Iullemeden .....	<b>25</b>
<b>fig. I-7</b> : Les transgressions marines post-paléozoïques dans le bassin des Iullemeden.....	<b>27</b>
<b>fig. I-8</b> : Coupe géologique du bassin des Iullemeden.....	<b>29</b>
<b>fig. I-9</b> : Série géologique type sur le degré carré de Niamey.....	<b>31</b>
<b>fig. I-10</b> : Carte piézométrique de la nappe phréatique sur le degré carré de Niamey.....	<b>34</b>
<b>fig. II-1</b> : Localisation des points de prélèvement.....	<b>40</b>
<b>fig. II-2</b> : Résultats de la classification hiérarchique ascendante.....	<b>43</b>
<b>fig. II-3</b> : Diagramme de fréquence des paramètres physico-chimiques des aquifères profonds du Continental Terminal.....	<b>46</b>
<b>fig. II-4</b> : Diagramme de fréquence des paramètres physico-chimiques de la nappe phréatique.....	<b>47</b>
<b>fig. II-5</b> : Diagramme de Piper pour les eaux des aquifères profonds du Continental Terminal.....	<b>49</b>
<b>fig. II-6</b> : Variation du sodium en fonction du chlorure dans les nappes profondes.....	<b>51</b>
<b>fig. II-7</b> : Variation du calcium en fonction du sodium dans les nappes profondes.....	<b>51</b>
<b>fig. II-8</b> : Diagramme de Piper pour les eaux de la nappe phréatique.....	<b>53</b>
<b>fig. II-9</b> : Diagramme de Piper pour les eaux du groupe 3 .....	<b>53</b>
<b>fig. II-10</b> : Diagramme d'équilibre vis à vis de la calcite pour les eaux des nappes profondes.....	<b>55</b>
<b>fig. II-11</b> : Diagramme d'équilibre vis à vis de la dolomite pour les eaux des nappes profondes.....	<b>55</b>
<b>fig. II-12</b> : Diagramme d'équilibre vis à vis du gypse pour les eaux des nappes profondes.....	<b>56</b>
<b>fig. II-13</b> : Diagramme d'équilibre vis à vis des minéraux silicatés magnésiens pour les eaux des nappes profondes.....	<b>56</b>
<b>fig. II-14</b> : Diagramme d'équilibre vis à vis de la calcite pour les eaux de la nappe phréatique et du groupe 3.....	<b>58</b>
<b>fig. II-15</b> : Diagramme d'équilibre vis à vis de la dolomite pour les eaux de la nappe phréatique et du groupe 3.....	<b>58</b>
<b>fig. II-16</b> : Diagramme d'équilibre vis à vis du gypse pour les eaux de la nappe phréatique et du groupe 3.....	<b>59</b>
<b>fig. II-17</b> : Diagramme d'équilibre vis à vis des minéraux silicatés magnésiens pour les eaux de la nappe phréatique et du groupe 3.....	<b>59</b>

<b>fig. II-18</b> : Diagramme de fréquence des teneurs isotopiques des aquifères profonds du Continental Terminal.....	<b>61</b>
<b>fig. II-19</b> : Diagramme de fréquence des teneurs isotopiques des eaux de la nappe phréatique.....	<b>62</b>
<b>fig. II-20</b> : Diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ .....	<b>64</b>
<b>fig. II-21</b> : Evolution des teneurs en $^{18}\text{O}$ en fonction des concentrations en chlorure.....	<b>67</b>
<b>fig. III-1</b> : Localisation des forages.....	<b>75</b>
<b>fig. III-2</b> : Carte indiquant les altitudes du socle non altéré.....	<b>78</b>
<b>fig. III-3</b> : Carte des isobathes du socle altéré.....	<b>79</b>
<b>fig. III-4</b> : Epaisseur des altérites.....	<b>81</b>
<b>fig. III-5</b> : Sommet de l'aquifère des sables inférieurs.....	<b>82</b>
<b>fig. III-6</b> : Epaisseur des sables inférieurs.....	<b>84</b>
<b>fig. III-7</b> : Sommet de l'aquifère des oolithes.....	<b>86</b>
<b>fig. III-8</b> : Sommet de l'aquifère des oolithes sans les niveaux de Zimba et Karey Bangou.....	<b>87</b>
<b>fig. III-9</b> : Epaisseur de l'aquifère des oolithes.....	<b>90</b>
<b>fig. III-10</b> : Cartographie de la base de la nappe phréatique.....	<b>92</b>
<b>fig. III-11</b> : Epaisseur de la formation imperméable entre le socle et les sables inférieurs.....	<b>94</b>
<b>fig. III-12</b> : Epaisseur de la formation imperméable entre les sables inférieurs et les oolithes.....	<b>95</b>
<b>fig. III-13</b> : Epaisseur de la formation imperméable entre les oolithes et la nappe phréatique.....	<b>96</b>
<b>fig. III-14</b> : Extension des différentes nappes.....	<b>98</b>
<b>fig. III-15</b> : Coupe ouest-est (A-A').....	<b>99</b>
<b>fig. IV-1</b> : Carte piézométrique des niveaux relevés dans les puits.....	<b>107</b>
<b>fig. IV-2</b> : Niveaux piézométriques des nappes profondes.....	<b>111</b>
<b>fig. V-1</b> : Relations entre les différentes nappes.....	<b>115</b>
<b>fig. V-2</b> : Coupe schématique.....	<b>117</b>

## AVANT-PROPOS

Au moment où je termine, je remercie tout d'abord M. Pierre Chevallier d'avoir accepté ma présence au sein de l'Unité de Recherche 21 dans le Laboratoire d'Hydrologie du centre ORSTOM-Montpellier.

Je remercie également toute l'équipe du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique d'Orsay dans lequel j'ai pu effectuer les analyses isotopiques nécessaires au bon déroulement de ce travail. Mes remerciements vont en particulier à Sandra Van-Exter pour la patience et la pédagogie dont elle a fait preuve lors de mon initiation aux différentes techniques de l'analyse isotopique.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à Guillaume Favreau, qui effectue actuellement son service national en tant que coopérant au centre ORSTOM de Niamey, pour l'important travail de terrain qu'il a fourni et sans lequel cette étude n'aurait pu être menée à bien. Il a notamment effectué les prélèvements d'eaux préliminaires aux analyses chimiques et isotopiques et a consacré une importante partie de son temps à la mise en œuvre d'une campagne de nivellement nécessaire à l'établissement des cartes piézométriques présentes dans ce mémoire. Je le remercie aussi pour les précieuses informations dont il m'a fait part pendant toute la durée de ce stage. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance et de ma sympathie.

Je tiens enfin tout particulièrement à associer à ce mémoire ceux qui ont suivi et conseillé mes travaux :

Christelle Marlin, co-responsable avec Laurent Dever du DEA Hydrologie et Hydrogéologie de Paris XI, pour m'avoir guidé dans la partie géochimique de mon travail,

Christian Leduc, mon maître de stage, pour la disponibilité dont il a fait preuve et pour la richesse du sujet qu'il a proposé. En effet, cette étude m'a permis de voir l'hydrogéologie sous divers aspects : géologique, hydrodynamique et géochimique. Cette vue générale de l'hydrogéologie associée à ses conseils judicieux sur la façon de mener à bien un tel travail m'a permis de tirer un bon nombre d'enseignements qui, je pense, me seront très utiles pour la suite. De tout cela je l'en remercie.



## INTRODUCTION

Ce mémoire rend compte d'un stage de 5 mois (février-juin 1996) effectué dans le cadre du DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie. Ce stage s'est déroulé en deux parties :

- une partie pratique effectuée au sein du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de Paris Sud mise à profit pour apprendre et appliquer les techniques d'analyse des isotopes stables de la molécule d'eau (2 mois),
- la deuxième partie effectuée au laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM de Montpellier (3 mois) sous la direction de C. Leduc, CR1 de l'UR21 du Département des Eaux Continentales de l'ORSTOM, a consisté à traiter et à analyser des données hydrogéologiques d'origines diverses.

La présente étude est réalisée en continuité avec le projet Hapex-Sahel (Hydrology and Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel). Ce programme s'intègre dans les actions menées sous l'égide du Programme Mondial de la Recherche sur le Climat (PRMC). La finalité de ce projet est d'estimer de façon rigoureuse les paramètres hydrologiques et climatiques des régions semi-arides utilisés dans les modèles globaux de circulation atmosphérique.

Afin d'apprécier la variabilité des processus de redistribution de l'eau à l'échelle de la maille élémentaire (une dizaine de milliers de km<sup>2</sup>) sous climat semi-aride, le projet Hapex-Sahel a cherché à identifier le fonctionnement hydrologique du degré carré de Niamey (2 et 3°E et 13 et 14°N) soit une surface de 12 000 km<sup>2</sup>, à l'intérieur de laquelle l'acquisition des paramètres hydrologiques s'est faite à toutes échelles, de la parcelle au degré carré.

Ainsi, l'étude des paramètres contrôlant les échanges entre la surface continentale et l'atmosphère a mené à s'interroger sur le rôle des eaux souterraines dans les processus hydrologiques. Il apparaissait donc nécessaire de caractériser les processus de recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal dans le degré carré de Niamey. Les recherches antérieures ont proposé 2 formes de recharges :

- pour l'essentiel, en provenance de la surface, par l'intermédiaire des mares constituant le terme des systèmes endoréiques caractérisant l'hydrographie régionale (Desconnets et al. 1993),
- dans une moindre mesure, d'origine profonde, en provenance des aquifères sous-jacents. Cette hypothèse avait été évoquée par Greigert (1978) dans son bilan sur les nappes du Continental Terminal du Synclinal de Dogondoutchi.

En effet, ce dernier proposait un amincissement et un biseautage des différents niveaux du Continental Terminal sur les bords du synclinal. L'amincissement des couches imperméables aurait pu favoriser les phénomènes d'échange entre les diverses formations aquifères.

Au cours de l'expérimentation Hapex-Sahel, les observations hydrodynamiques et hydrogéochimiques sur la nappe phréatique ont révélé des anomalies dans le nord-ouest soutenant l'idée de relations entre cette dernière et les horizons aquifères plus profonds. En

outre, l'étude géologique des aquifères du Continental Terminal sur la zone plus restreinte du degré carré de Niamey (Monfort, 1996) a montré que les séries sédimentaires s'amincissaient de façon importante dans la même zone relançant ainsi la proposition de Greigert.

Dans le but de confirmer cette idée, les données chimiques, géologiques et hydrodynamiques disponibles sur l'ensemble de la zone ont pu être rassemblées. Ces données sont les suivantes :

- analyses chimiques et isotopiques relevées lors des diverses campagnes d'échantillonnage effectuées au cours du programme Hapex,
- levés piézométriques sur un réseau de puits constitué au cours du même projet,
- existence de coupes de forage décrivant localement la géométrie des différentes formations du Continental Terminal.

Cet ensemble de données peut paraître conséquent et largement suffisant pour répondre à la question posée. Mais, il est nécessaire de mettre d'ores et déjà l'accent sur les obstacles rencontrés. Ces difficultés sont essentiellement liées aux importantes incertitudes qui pèsent sur ces données qui ont grandement limité leurs interprétations. Brièvement, on peut citer comme exemples :

- les données chimiques, la non identification des aquifères dans lequel les eaux ont été prélevées,
- pour les données piézométriques, la non représentativité du niveau statique à un instant donné due aux variations journalières (liées au pompage) ou aux variations saisonnières,
- pour les données géologiques, l'incertitude sur la localisation et les altitudes des têtes de forage limitant la reconstitution géométrique des aquifères.

Un énoncé détaillé de tous ces problèmes sera établi dans chaque partie de ce mémoire. Le lecteur est invité à le lire attentivement afin de ne pas perdre de vue les limites des interprétations faites dans cette étude. De fait, il ne faut pas prendre ce travail comme un exposé exhaustif de la question, mais comme un état des connaissances non définitif, issu d'une réflexion limitée dans le temps. Certains points resteront encore à préciser.

Ce mémoire comprend quatre parties :

- Une première partie présentera le cadre géographique, géologique et hydrogéologique à l'échelle du degré carré de Niamey.
- La seconde partie abordera l'aspect géochimique, elle permettra de caractériser les différents aquifères sur le plan chimique et isotopique afin d'appuyer les discussions qui viendront dans les parties suivantes. Un premier bilan sera fait sur l'apport de l'hydrochimie au sujet des relations entre les diverses nappes.
- La troisième partie sera consacrée à l'identification géologique détaillée des aquifères. Cette partie comprendra en outre des remarques sur les relations géométriques entre les différentes nappes.
- Enfin, la quatrième partie abordera les relations entre les différents aquifères sous l'aspect hydrodynamique. Une discussion sera faite sur les piézométries relevées dans les puits ainsi qu'une comparaison des niveaux piézométriques des différentes nappes.

La conclusion synthétisera toutes ces données et proposera un schéma général des relations entre les diverses nappes présentes dans la région.

***Chapitre I :***  
***Présentation de la zone***  
***d'étude***



## **I-1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE**

### **I-1-1 Localisation**

Le Niger est situé au centre de l'Afrique Occidentale. Il est entouré par sept autres pays : Algérie, Libye, Tchad, Nigéria, Bénin, Burkina Faso, Mali. Il s'étend grossièrement entre 11° et 23° de latitude nord et 0° et 16° de longitude sur une surface de 1 267 000 km<sup>2</sup>. C'est un pays entièrement continental (Océan Atlantique à 700 km au sud et 1900 km à l'ouest, Mer Méditerranée à 1200 km au Nord), dont les quatre cinquièmes du territoire se situent en zone désertique ou semi-désertique. Le Niger occidental, approximativement 12° et 15°N et 0° et 4°E se situe dans la bande sahélienne du continent africain (fig I-1).

La zone d'étude à proprement parler se localise au nord de Niamey. Elle est définie précisément par les méridiens 1°54' et 2°20'E et les parallèles 13°30' et 14°N. Elle englobe le sud du département de Tillabéri et les parties nord et ouest de la commune de Niamey. Le relief, lié à une ancienne pénéplaine, est peu accentué, l'altitude variant d'environ 180 m dans la vallée du fleuve Niger à 270 m sur les plateaux.

### **I-1-2 Cadre climatique**

Le climat du Niger occidental, défini comme semi-aride sahélien, est régi par le déplacement annuel nord-sud du Front Inter-Tropical (F.I.T). Il est caractérisé par une courte saison des pluies en été et une longue saison sèche.

#### **I-1-2-1 les précipitations**

##### **Mécanisme météorologique**

Au-dessus de l'Afrique occidentale, la majeure partie des précipitations est provoquée par la rencontre des alizés boréaux en provenance de l'anticyclone saharien et des alizés austraux provoqués par l'anticyclone sud atlantique de S<sup>te</sup> Hélène. L'harmattan, alizé boréal, est rendu sec et chaud par son passage au-dessus du Sahara. La mousson, alizé austral, en provenance du Golfe de Guinée est humide et légèrement plus froide. Au point de convergence entre les deux masses d'air, l'air boréal moins dense passe au-dessus de l'air austral limitant ainsi son ascendance (Pédelaborde, 1976 in Le Gal La Salle, 1990). Il y a formation d'une frontière appelée Front Inter-Tropical (F.I.T) au sol et Zone de Convergence Intertropicale (ZCI) en altitude (Taupin et al., 1997).

La Zone de Convergence Intertropicale (ZCI) est le lieu de formation de nuages à fort développement vertical. Ces systèmes nuageux prennent naissance dans les régions centrafricaines et se déplacent d'est en ouest le long de la ZCI. Ces formations, appelées lignes de grains, sont à l'origine de la majeure partie des précipitations au-dessus de la bande sahélienne.

L'anticyclone sud atlantique, très dynamique de février à septembre, est responsable de la pénétration des flux de mousson à l'intérieur du continent. Le Front Inter-Tropical est alors déplacé vers le nord, initiant ainsi la saison des pluies dans la bande sahélienne.

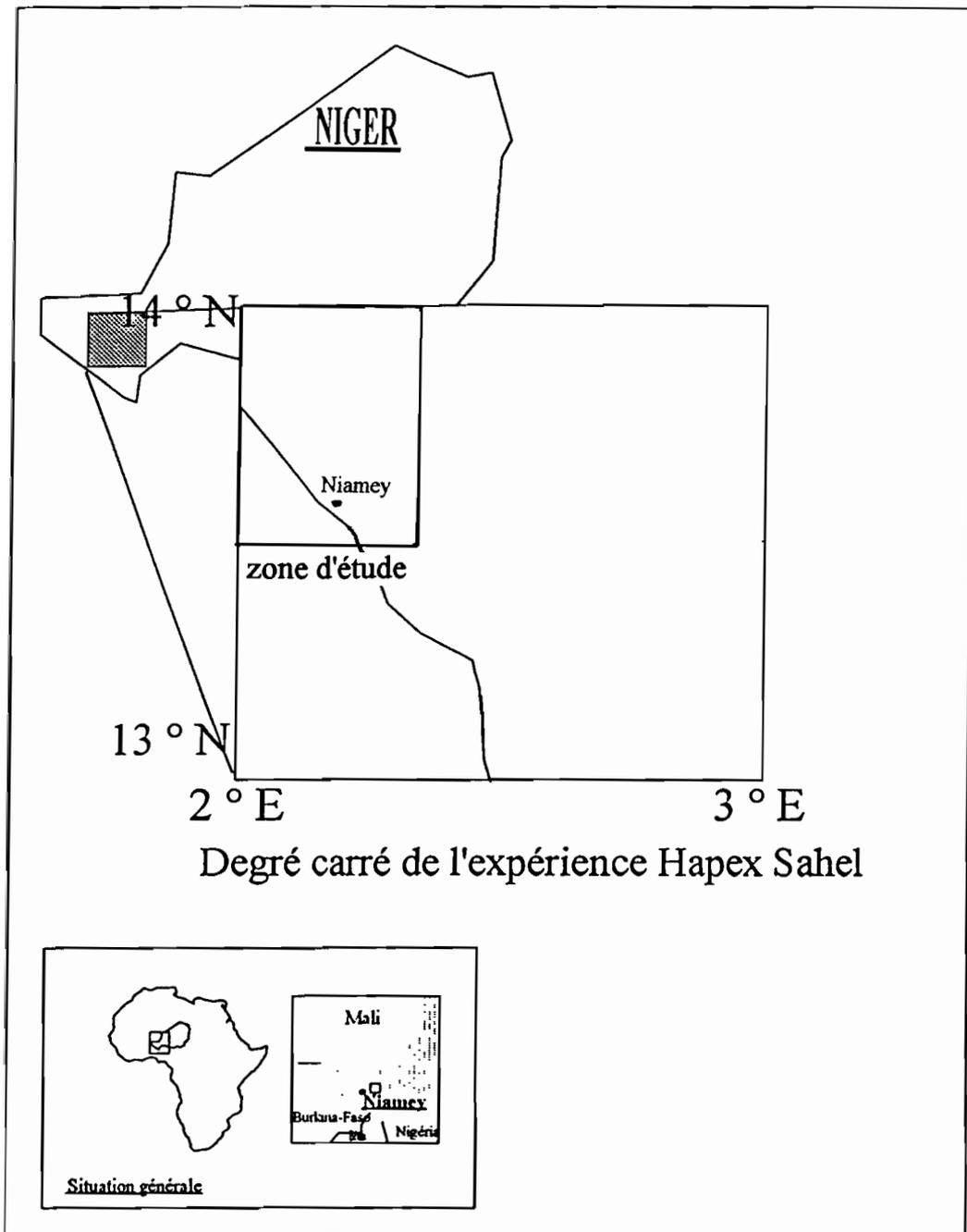


fig. I-1 : Situation générale et localisation de la zone d'étude

## Caractéristiques

Environ 90% des précipitations annuelles tombe entre fin juin et septembre (fig I-2). Sur le degré carré de Niamey, les isohyètes calculées sur les valeurs moyennes annuelles de la période 1951-1989 varient de 400 mm au nord à 700 mm au sud (L'Hôte et Mahé, 1996).

Les lignes de grain sont responsables de la majorité des précipitations. Elles provoquent des pluies intenses et très localisées pouvant atteindre 200 mm.h<sup>-1</sup> sur une dizaine de minutes.

Au pas de temps annuel, les précipitations sont caractérisées par une grande variabilité spatiale et temporelle :

-la variabilité spatiale apparaît sur un secteur donné par un tracé des isohyètes très perturbé, parsemé d'anomalies ponctuelles (fig I-4). Ainsi en 1991, il a été relevé une différence pluviométrique de 100% entre deux stations distantes de 30 km seulement (Taupin et al., 1992).

-la variabilité temporelle se traduit pour un même secteur par un tracé des isohyètes qui varie fortement d'une année à l'autre (fig I-4). Elle est aussi bien illustrée par l'écart interannuel considérable de 450 mm relevé entre les années 1926 et 1927 sur la station de Niamey-ville et l'écart-type important de 128 mm pour une moyenne de 561 mm calculés à partir de la chronique de 1905 à 1990 de la même station (fig I-3).

A plus grande échelle, sur l'ensemble du Quaternaire, plusieurs études paléoclimatiques ont montré l'existence de périodes plus humides et plus froides qu'actuellement (Tehet et al., 1990 ; Gasse et al., 1990).

### **I-1-1-2 Les autres paramètres climatiques**

#### Température

La température moyenne est de 29°C avec une fluctuation de 4°C entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid. Elle reste stable d'une année à l'autre. L'amplitude journalière est par contre forte et peut varier de 9°C à 15°C suivant la saison (Taupin, 1990).

#### Humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air dépend de l'alternance des masses d'air sèches et humides balayant la zone consécutivement au déplacement annuel du FIT. Elle a tendance à augmenter de février à août sous la montée de la mousson passant de 17% à 74% et à diminuer entre septembre et janvier (Charre 1974, in Taupin 1990).

#### Evaporation

La valeur estimée par méthode directe sur bac de classe A par la Direction de la Météorologie Nigérienne entre 1991-1993 sur la station de Niamey-aéroport atteint 4000 mm par an. Les variations saisonnières sont bien marquées avec un minimum en saison des pluies (5 mm.j<sup>-1</sup> en août) et un maximum en saison sèche (16 mm.j<sup>-1</sup> en mars-avril) (Desconnets, 1994).

### **I-1-3 Cadre géomorphologique et végétation**

D'un point de vue morphologique, le paysage se caractérise par un relief tabulaire dans lequel il est toutefois possible de distinguer, schématiquement, trois unités géomorphologiques

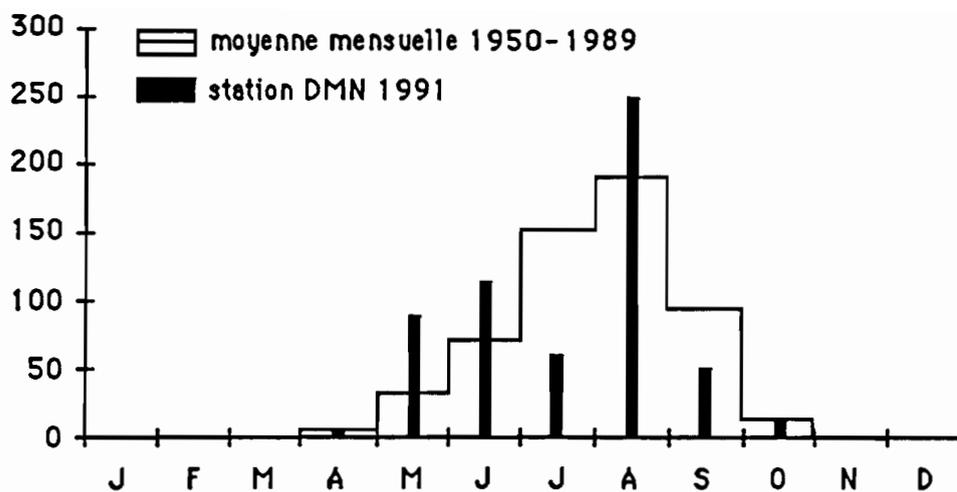


fig. I-2 : Hyetogramme mensuel de 1991 à Niamey-Ville rapporté au hyetogramme moyen de la période 1950-1989 (Taupin et al., 1992)

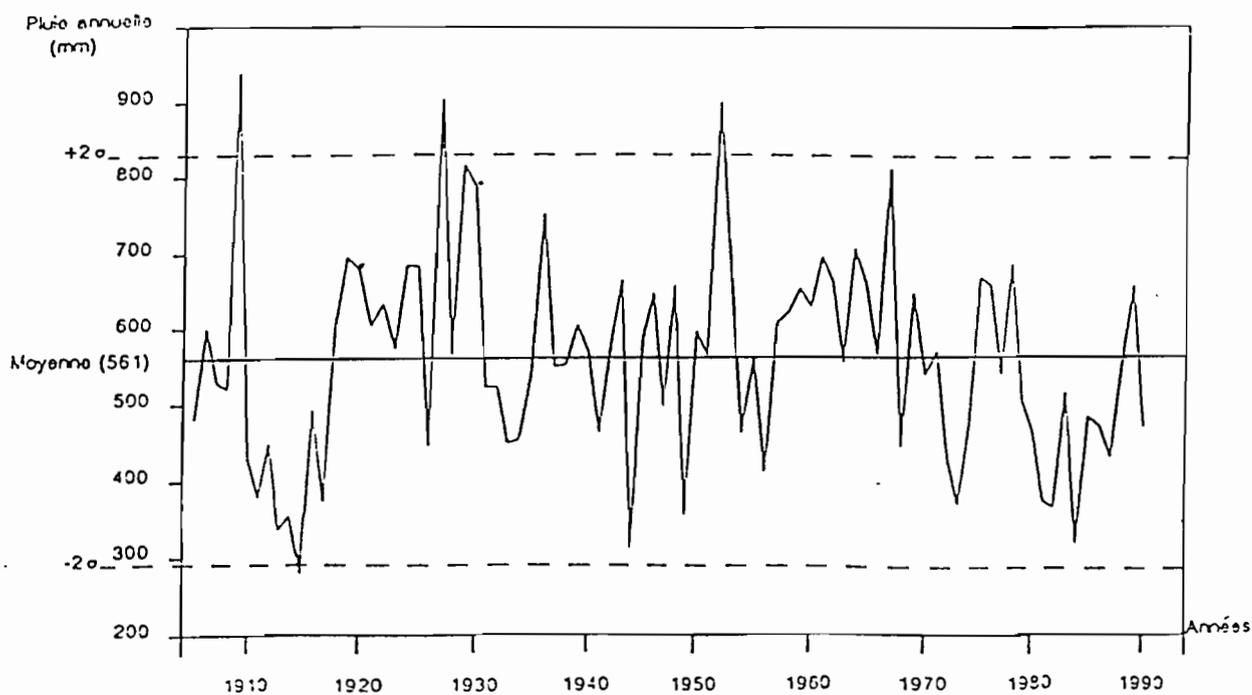


fig. I-3 : Chronique des totaux pluviométriques annuels à Niamey-ville de 1905 à 1990 ; les années 1911 et 1920 sont reconstituées (source D.M.N. Niamey, in Desconnets, 1994)

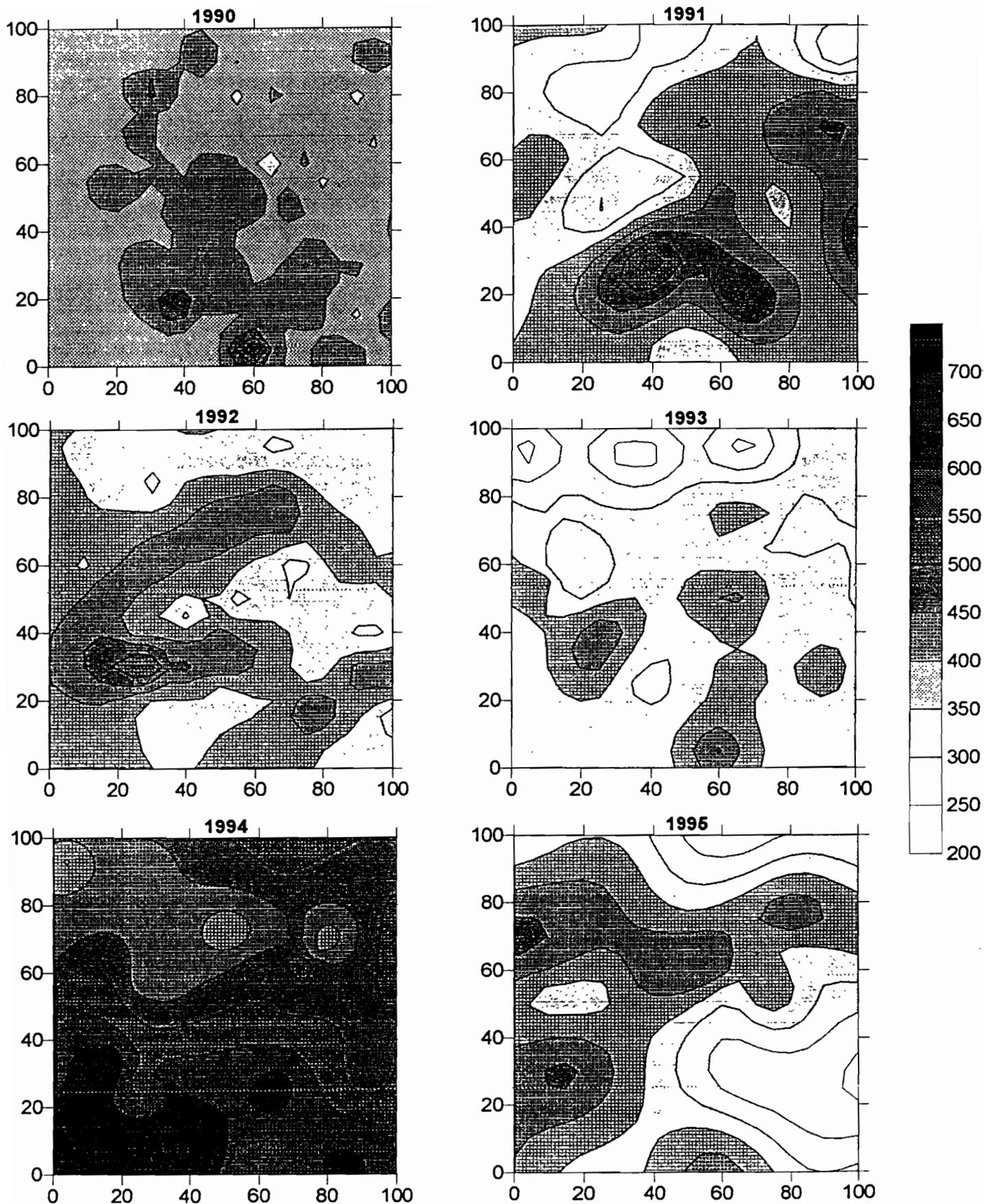


fig. I-4 : Répartition de la pluviométrie sur le degré carré de Niamey de 1990 à 1995 (Taupin et al., 1996)

(Courault et al., 1990) : les plateaux latéritiques, les glacis sableux et les bas fonds. Chaque grand ensemble est caractérisé par un couvert végétal spécifique (fig I-5) (Desconnets, 1994) :

#### Les plateaux latéritiques

Ces plateaux surmontés par des cuirasses ferrugineuses sont datés du Pliocène. Ils ont été entaillés au cours des différentes périodes pluvieuses du Quaternaire par de larges vallées aujourd'hui en partie comblées par des dépôts sableux. Les sols qui s'y développent sont de type lithosols plus ou moins rubéfiés. Généralement inférieurs à un mètre, ils peuvent être parfois recouverts par un manteau sableux. La végétation des plateaux est marquée par la brousse tigrée, alternance de bandes de végétation arbustive (*Combretum*, *Boscia*) et de larges espaces de sol nu. Les plateaux se terminent par un talus, zone de forte pente faisant la transition avec le glacis sableux.

#### Les glacis sableux

Le glacis sableux est constitué par des dépôts éoliens datant du Pléistocène supérieur. Le couvert végétal alterne culture et végétation naturelle de ligneux bas (*Commiphora africana*). Les zones de culture sont partagées entre champ de mils et jachères colonisées par une espèce arbustive presque unique (*Guiera senegalensis*) et une grande diversité d'herbacées, annuelles ou pérennes (D'Herbès et al., 1995 in Leduc et Loireau, 1997).

#### Les bas fonds

Les vallées et les bas fonds sont remplis par des sables à texture fine, pouvant devenir argileuse ou grossière dans l'axe des cours d'eau fossiles. La végétation devient plus dense et variée à l'approche des mares temporaires, les espèces végétales se répartissant de façon concentrique suivant leur besoin hydrique (*Acacia albida*, *Balanites aegyptica*).

### **I-1-3 Hydrographie**

A l'échelle du degré carré, seul le fleuve Niger a un écoulement pérenne. Le reste du réseau hydrographique est constitué :

- à l'ouest du fleuve Niger, par des oueds ne coulant que pendant la saison des pluies et aboutissant dans le fleuve,
- à l'est du fleuve, région à laquelle appartient la zone d'étude, par une mosaïque de petits bassins endoréiques.

En effet, dans cette région, il n'existe pas de cours d'eau, même temporaires, à proprement parler. L'ancien réseau hydrographique a été obstrué par des dépôts éoliens. Ces cours d'eau fossiles sont appelés Kori ou Dallol suivant leur taille, les dallols pouvant dépasser 10 km de largeur. Cependant, selon l'intensité de la pluie et l'état de surface, une fraction variable des bassins endoréiques contribue aux écoulements qui peuvent parfois complètement disparaître et se reconstituer plus ou moins partiellement à l'aval pour finalement aboutir à des mares temporaires.

Dans la description de ces systèmes endoréiques, Desconnets (1994) a distingué deux types de mares :

#### Les mares de plateaux

Peu encaissées, avec un bassin versant de faible superficie, l'essentiel de leur vidange est dû à l'évaporation.

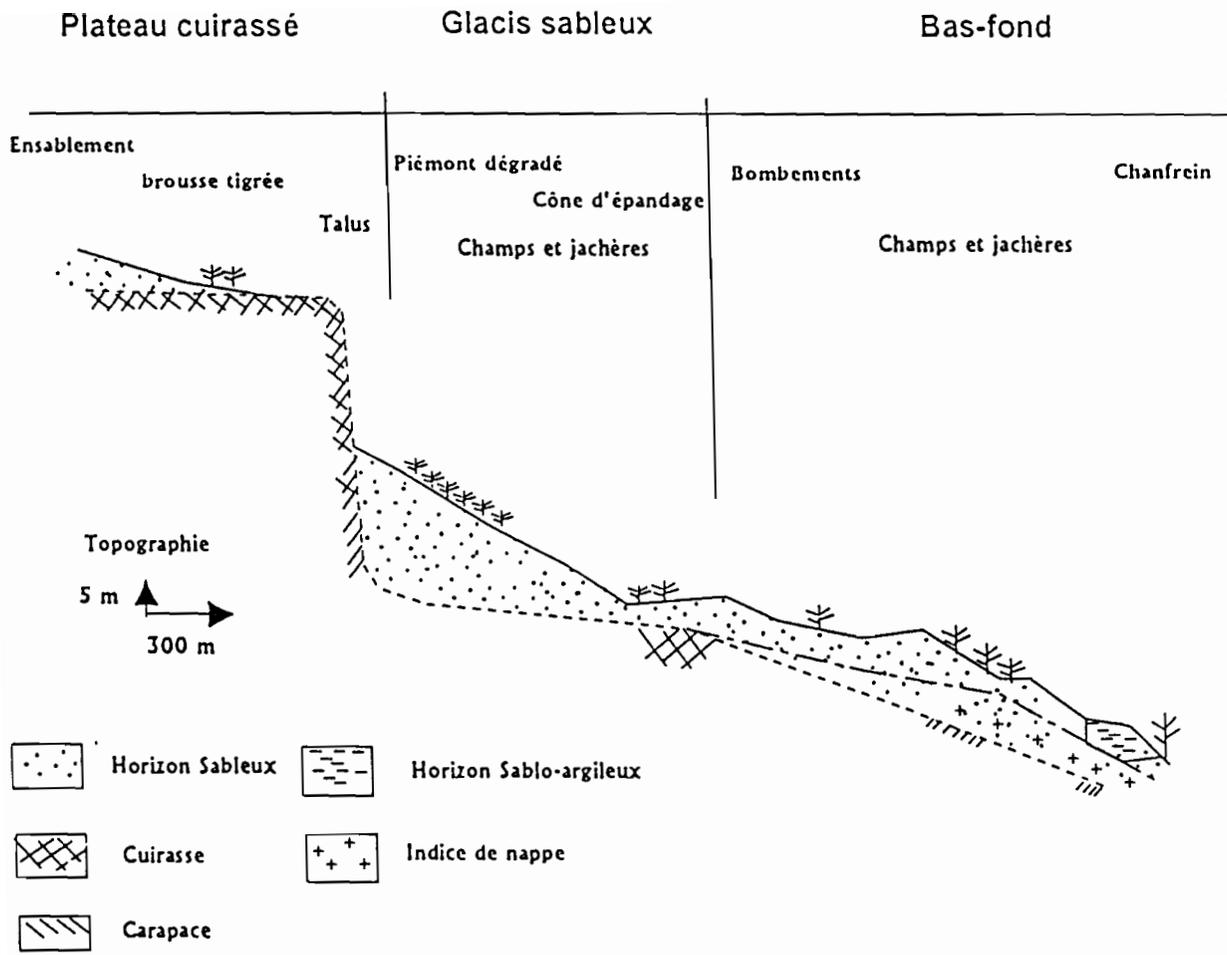


fig. I-5 : Toposéquence représentative du paysage du degré carré de Niamey (Courault et al., 1990)

### Les mares de vallée et de bas fond

Plus encaissées, avec un bassin versant drainant des surfaces plus importantes, elles se vident principalement par infiltration. Dans les koris, elles sont séparées par des verrous sablo-argileux d'accumulation détritique. Ces points d'infiltration sont la principale source de la recharge de la nappe phréatique.

## **I-2 GEOLOGIE**

En ce qui concerne la géologie du Niger Occidental, la référence de base est le rapport de Greigert (1966) sur la description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden. Ce document n'étant pas disponible dans son intégralité à l'ORSTOM, l'histoire géologique a été reconstituée à partir de publication postérieure reprenant les travaux de Greigert.

Le Continental Terminal affleure dans la partie ouest du bassin sédimentaire des Iullemeden. Ce bassin est constitué en alternance de dépôts marins et continentaux mis en place lors des différents épisodes transgressifs et régressifs qui jalonnent son histoire. Le Continental Terminal en constitue la dernière série, purement continentale comme son nom l'indique, son histoire est mal connue et surtout mal référencée dans le temps faute d'indices paléontologiques.

### **I-2-1 Le bassin des Iullemeden avant le Continental Terminal**

Le bassin des Iullemeden est limité par les massifs cristallins du Liptako-Gourma, de l'Adrar des Iforas, du Hoggar, de l'Air, du Damagaram-Mounio et du Nigéria (fig. I-6). Il communique au nord-ouest avec le bassin de Taoudéni (Mali) par l'intermédiaire du fossé de Gao qui sépare l'Adrar des Iforas du Gourma, et avec ceux du Niger Oriental (Tchad, Bilma, Termit) par le seuil du Damergou.

Ce bassin correspond à une aire sédimentaire cratonique (Bertrand-Sarfati et al. , 1977 in Abdoukarimou, 1988) affectée de mouvements épirogéniques (Faure, 1966, in Abdoukarimou, 1988) qui ont entraîné une migration vers le sud-ouest des dépôts primaires et secondaires.

#### **I-2-1-1 Histoire géologique**

##### **Du Cambrien au Cénomaniens**

Au cours du Primaire, le bassin des Iullemeden est un golfe marin ouvert vers le nord. La sédimentation à dominante détritique est de type deltaïque sur les bordures.

Du Permien au Cénomaniens inférieur, sur plus de 150 MA, on assiste à une sédimentation détritique à caractère continental qui aboutit à la formation du **Continental Intercalaire** reposant en discordance sur les séries sous-jacentes. Cet ensemble est recouvert par la première transgression du Cénomaniens supérieur.

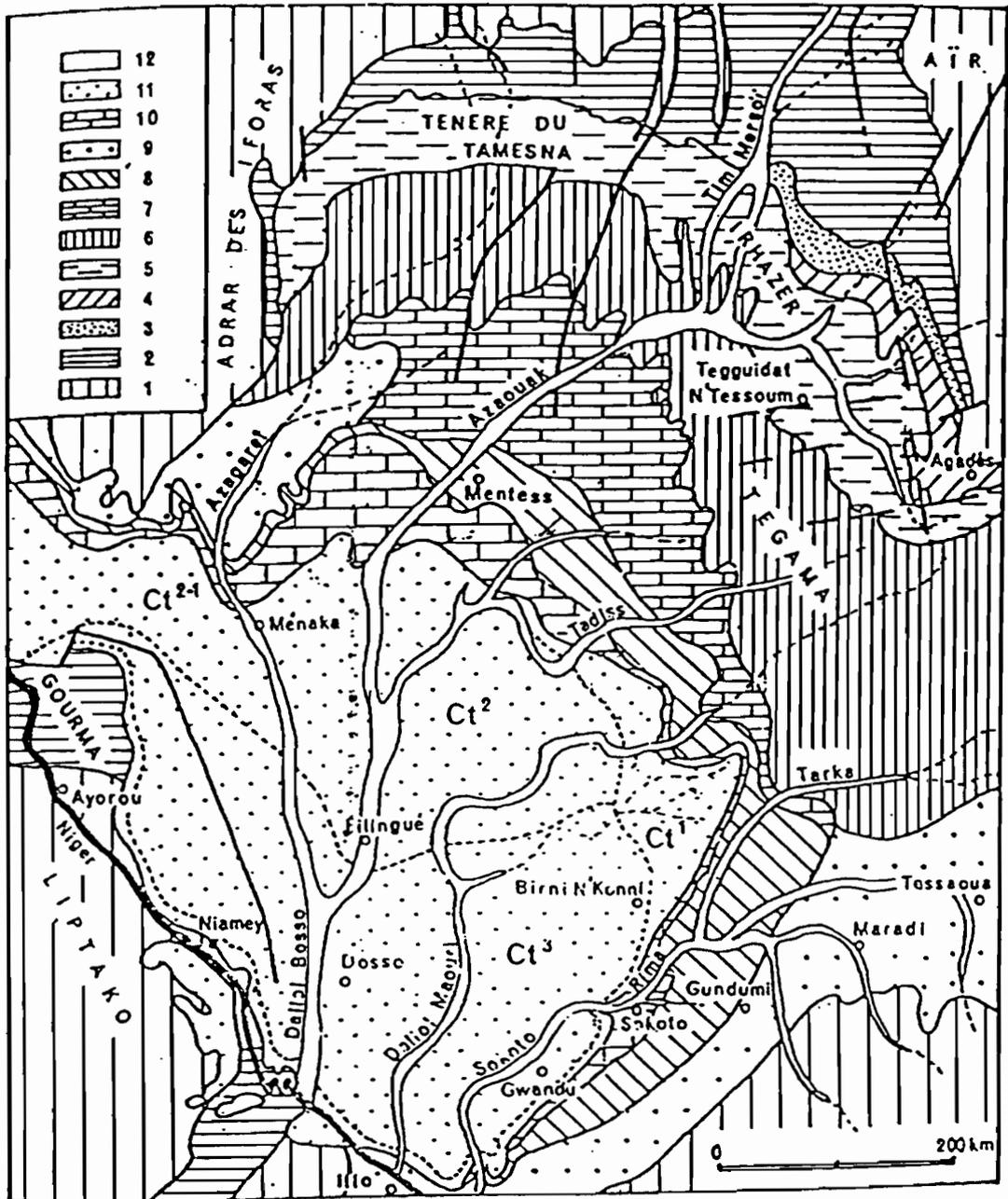


fig. I-6 : Géologie du bassin des Iullemeden  
(Greigert et Pougnet, 1965 modifiée par Dubois 1981)

1. Précambrien, 2. Cambrien - Carbonifère, 3. Permien, 4. Trias - Jurassique, 5. Wealdien, 6. Albien - Cénomaniens inférieur, 7. Cénomaniens supérieur - Sénonien moyen, 8. Sénonien supérieur, 9. Continental hamadica, 10. Paléocène - Yprésien, 11. Continental terminal, 12. Alluvions quaternaires.

### Le Crétacé supérieur

Le Crétacé supérieur est marqué par une série de cycles sédimentaires commandée par le soulèvement de la marge nord-est du bassin (fig. I-7).

Au Cénomanién supérieur, le golfe mésogéen existant déjà à l'est de l'Air pénètre dans le Niger Occidental amenant 3 épisodes transgressifs ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ), chacun d'entre eux débordant le précédant vers le sud-ouest (Dubois et Lang, 1981).

La surrection de l'Air tardi-maestrichtienne, ferme définitivement cette communication. Cependant parallèlement, l'effondrement du détroit de Gao crée un nouveau passage qui permettra à deux ultimes transgressions ( $t_4$ ,  $t_5$ ) de pénétrer dans le bassin.

Les formations sont composées :

- au centre du bassin, d'alternance de dépôts marins (faunes mésogéennes des mers chaudes) et de dépôts subcontinentaux riches en végétaux houillifiés et en restes de vertébrés (Boudouresque et al., 1982),

- sur les bordures nord-ouest et sud, de dépôts fluviatiles constitués de grès grossiers, à graviers de quartz et à ciment kaolinique bariolé. Ces grès sont identifiés comme **Continental Hamadien** (Killian, 1931 in Abdoukarimou, 1988), équivalent continental des formations postérieures à la transgression cénomaniénne.

### Le Tertiaire

Du point de vue stratigraphique, avant les séries du Continental Terminal, les seuls étages reconnus sont le Paléocène supérieur et la base de l'Yprésien. La sédimentation y est à dominante chimique et biochimique formant calcaires, phosphates et attapulgites (Monciardini, 1965, 1966, 1967 in Boudouresque et al., 1982).

#### **I-2-1-2 Données structurales**

Le bassin est marqué par trois directions tectoniques :

- les failles de la bordure nord du bassin, sensiblement méridiennes et s'infléchissant ensuite vers le sud-ouest au niveau du 19<sup>e</sup> parallèle,

- les failles WSW-ENE se traduisent par le réseau de failles dites "failles de Téguidat" à l'Ouest de l'Air,

- les failles NW-SE soulignent les grands accidents de la bordure occidentale du bassin qui abaissent brutalement le compartiment oriental de plus de 500 m. Elles sont également à l'origine du fossé d'effondrement de Gao (fig. I-6).

#### **I-2-2 Le Continental Terminal**

##### **I-2-2-1 Définition du Continental Terminal**

Le terme de Continental Terminal a été créé par Killian (1931 in Abdoukarimou, 1988) pour désigner le troisième ensemble continental détritico-cénozoïque qu'il distinguait dans l'histoire du Sahara. Toutefois il n'en précisait ni l'âge exact, ni l'origine et admettait qu'il pouvait présenter des faciès variés. Dans les études menées postérieurement, le terme a été repris par bon nombre d'auteurs, pour désigner toutes les formations postérieures au Crétacé supérieur et

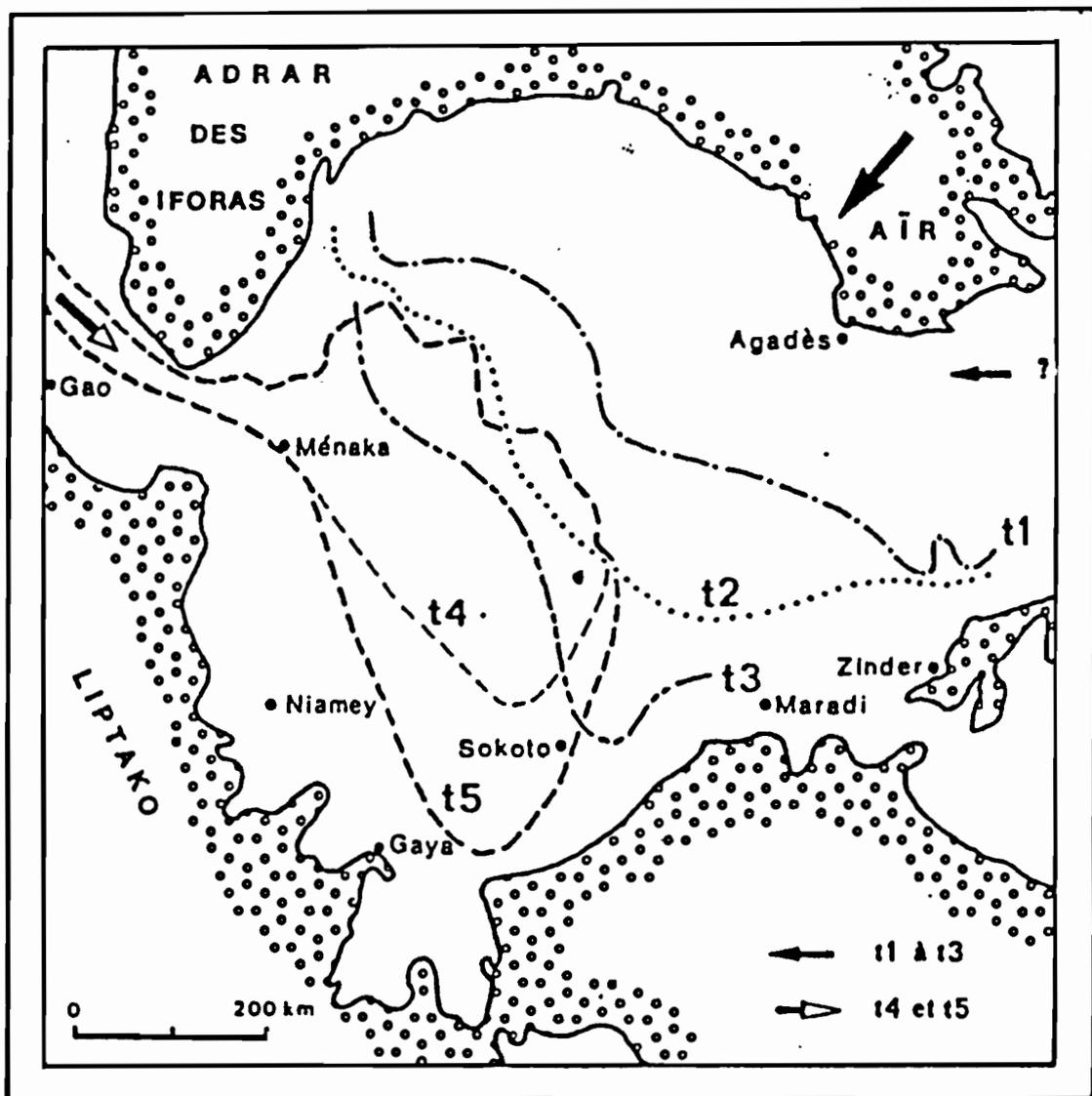


fig. I-7 : Les tansgressions marines post-paléozoïques dans le bassin des Iullemeden (Greigert, 1966 modifiée par Petters, 1977 in Abdoulkarimou, 1988)

- t1 transgression du Cénomanién supérieur à *Neolobites* ;
- t2 transgression du Turonien inférieur à *Neolobites* et *Nigericeras* ;
- t3 transgression du Maestrichtien à *Libycoceras* ;
- t4 transgression du Danu-Montien à *Libycoceras* ;
- t5 transgression du Paléocène supérieur.

composées d'épandages détritiques argileux et de concrétions ferrugineuses (faciès sidérolithique) en Afrique de l'Ouest.

Des études postérieures ont permis de préciser l'âge de la base de cette formation :

-Dubois (1979 in Boudouresque et al., 1982), par des considérations biostratigraphiques et géodynamiques, a proposé de faire appartenir la base du Continental Terminal, à l'Eocène moyen voire supérieur.

-Boudouresque (1982) a montré par des études palynologiques que l'ensemble était post-éocène moyen et anté-quatenaire.

-Par comparaison à d'autres régions d'Afrique de l'Ouest, Lang (1982 in Abdoukarimou, 1988) suppose que l'Oligocène correspond au moins en partie à une lacune de dépôts et que l'existence de dépôts éocènes supérieur reste possible.

Enfin, synthétisant toutes les données antérieures, le projet N°210 du P.I.G.C.P (Proceeding of the International Geological Correlation Project) a décidé de réserver le terme de Continental Terminal à toutes les formations détritiques quartzo-kaoliniques à faciès sidérolithique, disposées en discordance stratigraphique sur n'importe quel soubassement et d'âge compris entre l'Eocène moyen et le Quaternaire.

Il est à noter que la signification de ce terme est surtout géodynamique. En effet, il désigne des formations résultant de l'érosion des reliefs issus des déformations tectoniques du Tertiaire.

### **I-2-2-2 Dynamique de la sédimentation**

A l'Ypresien, le Niger est isolé du domaine océanique par des mouvements tectoniques verticaux relevant le cadre actuel du bassin. Une cuvette se forme où s'accumulent, sous un régime fluvial ou lacustre, les produits de démolition provenant principalement des formations sédimentaires du nord du bassin.

L'ensemble des sédiments s'est ainsi accumulé dans une forme synclinale d'axe nord-sud, correspondant à peu près à la ligne Filingué-Doutchi. Sa puissance peut atteindre 450 m à l'aplomb de cette ligne (fig. I-8). Cet ensemble est plus communément appelé "Synclinal de Dogondoutchi". D'après Greigert (1966), cette forme synclinale peut résulter :

-soit d'un relèvement des bords orientaux et occidentaux du bassin, le centre restant stable,

-soit d'un enfoncement de ce dernier, hypothèse qu'il retient (Greigert, 1978).

Or, pendant que s'accumulent les sédiments dans la cuvette, les roches du soubassement sud-ouest du bassin s'altèrent. Actuellement, cette zone d'altération est recouverte par les plus récents dépôts lacustres du Continental Terminal. Cette lithomarge est plus ou moins épaisse et souvent formée de kaolinite sur une épaisseur variant de quelques mètres à plus de 50m, les 10 derniers mètres n'ayant pas toujours été formés in situ mais remaniés au début du Continental Terminal (Machens, 1973).

L'origine continentale des dépôts confère à cette formation la particularité d'avoir d'importantes variations de faciès aussi bien latérales que verticales. Cependant les différentes formations du Continental Terminal sont marquées par deux caractéristiques :

-l'abondance du fer, formant les dépôts sidérolithiques correspondant à des niveaux de faible énergie (étendues fluvio-palustres). Imprégnant les argiles ou cimentant lessables, le fer se retrouve surtout sous la forme de concrétions oolithiques.



-la présence de matière organique, la végétation qui couvrait les parties exondées du bassin, se retrouve sous forme de menus débris d'amas de bois houillifié.

### **I-2-2-3 Lithologie du Continental Terminal**

#### Sur l'ensemble du bassin (fig. I-6)

Au sein du Continental Terminal du Niger, trois ensembles peuvent être distingués (Greigert et Pougnet, 1967) :

-la série sidérolithique de l'Ader Douchi caractérisée par plusieurs niveaux de formations oolithiques ferrugineuses (CT1) ; elle affleure sur la bordure à l'est de la ligne Birni N'Koni-Tahoua. Sur la bordure occidentale, le Continental Terminal repose en discordance sur les altérites du socle antécambrien alors qu'au sud elle repose sur le Continental Hamadien.

-la série argilo-sableuse à lignite (CT2) : elle est définie par une alternance d'argiles, sables et silts à grains bien classés et bien lavés. Les argiles noires contiennent des débris végétaux ligniteux. Elle affleure dans la partie septentrionale du bassin.

-la série des grès argileux (CT3) : elle affleure dans la partie SW du bassin.

#### Dans la zone d'étude

D'après Monfort (1996), sur l'ensemble du degré carré de Niamey, il est possible de reconnaître la lithologie suivante de bas en haut (fig. I-9) :

1-sables quartzeux et grès moyens à grossiers,

2-argiles grises à lignite au milieu desquelles on trouverait un niveau plus ou moins épais d'oolithes ferrugineuses emballées dans une matrice silto-argileuse,

3-alternance de sables, silts et argiles.

Les ensembles 1 et 2 formeraient le CT2. Le niveau 3 constituerait le CT3 dont la base serait le sommet des argiles grises à lignite.

## **I-3 HYDROGEOLOGIE DU CONTINENTAL TERMINAL**

### **I-3-1 Bibliographie**

Les synthèses disponibles sur les aquifères du Continental Terminal sont peu nombreuses et peu récentes. Pratiquement, la seule référence est Greigert qui a travaillé dans les années soixante et soixante-dix sur une étendue très vaste avec très peu d'informations. Dans son bilan (1978), il établit son travail sur une trentaine de forages couvrant l'ensemble du Continental Terminal. Depuis, à part la tentative d'Abdoukarimou (1988) faite à l'ouest du Dallol Bosso, il n'y a pas eu de réelles actualisations des connaissances, le projet PNUD (1991) n'ayant fait que compiler les informations antérieures.

Sur le degré carré de Niamey, Monfort (1996) a fourni une cartographie plus précise des aquifères mais n'a donné qu'à titre indicatif des informations sur la piézométrie des aquifères profonds, une carte piézométrique détaillée de la nappe phréatique ayant été établie par Leduc et al. (1997).

De manière générale, les données hydrogéologiques souffrent d'imprécisions fréquentes sur les altitudes liées à l'insuffisance de points nivelés sur l'ensemble de la zone. Ceci engendre

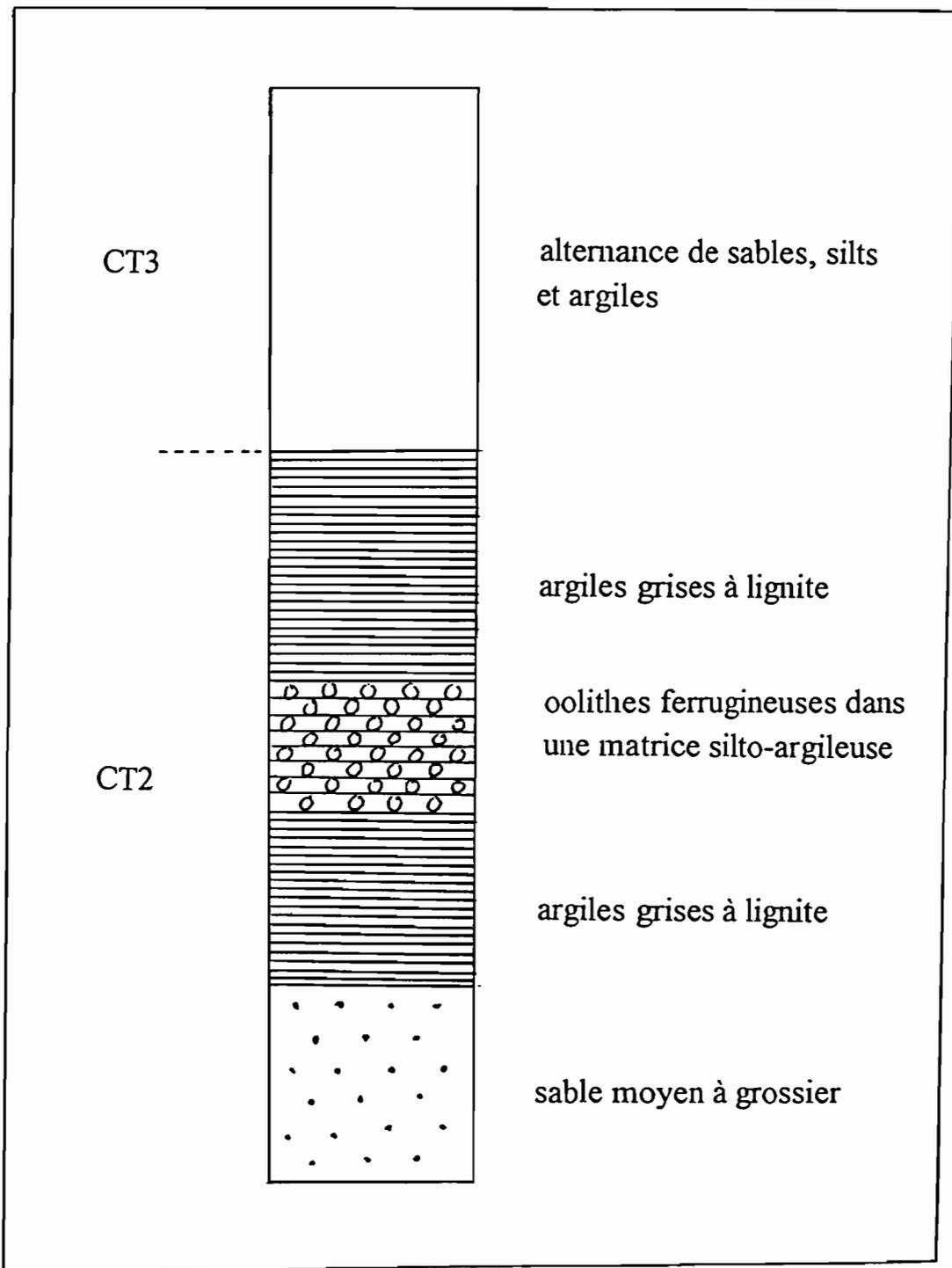


fig. I-9 : Série géologique type sur le degré carré de Niamey  
(Monfort, 1996)

d'importantes incertitudes sur l'extension spatiale des aquifères ainsi que sur la définition de leur piézométrie. Cette raison ajoutée au fait que les nappes du Continental Terminal ont généralement des gradients hydrauliques faibles rend difficile la détermination des zones de recharge et de vidange.

### **I-3-2 Présentation des différents aquifères**

Dans sa synthèse, Greigert (1978) admet d'emblée que le Continental Terminal forme un système aquifère complexe composé de plusieurs nappes mal définies géométriquement. Ces différentes formations aquifères seraient en communication. Il ne formule toutefois que des hypothèses quant à la nature et la localisation de ces relations.

De façon schématique, il divise ce système aquifère en trois grands ensembles :

- un système superficiel dit aquifère de la nappe phréatique
- un ensemble intermédiaire reconnu au centre du bassin et qu'il nomme les sables moyens,
- un système profond dit des sables inférieurs.

Les deux derniers ensembles se caractérisent par leur captivité sur la majeure partie du Continental Terminal. Sur les bordures, ces nappes peuvent être libres et en continuité hydraulique.

#### **1-3-1-1 Les sables inférieurs**

Cet ensemble se répartit géographiquement en trois grandes unités hydrogéologiques : un domaine sud-est, un ensemble au nord, et un troisième à l'ouest.

##### Nappe du domaine sud-est

Cette nappe fait corps avec la série lithologique dite 'sidérolithique de l'Adrar Doutchi' (CT1). Elle est constituée par des sables lavés d'une épaisseur de 30 à 70 m. Elle est en charge sur la majeure partie de la région et présentent un caractère artésien dans le fond des vallées. L'alimentation se ferait directement par la série sidérolithique de l'Adrar Doutchi à l'affleurement dans cette région. L'aquifère serait drainé par les bas dallols Bosso et Maouri.

##### Nappe du domaine nord

Ses limites sont encore mal connues. Elle est formée de niveaux de sables fins plus ou moins argileux. Cette nappe présente aussi un caractère captif. Des solutions de continuité seraient possibles avec le domaine précédent

##### Nappe du domaine occidental

Cette nappe est bien individualisée à l'ouest du dallol Bosso. Elle est constituée de sables moyens à grossiers d'une épaisseur pouvant varier de 2 à plus de 15 m. Cette formation appartiendrait au sens lithologique du terme au CT2 (Abdoulkarimou, 1988). Son toit est constitué par la formation des argiles grises à lignite et silts verdâtres. Le mur serait formé par le socle à l'extrême ouest (notamment dans notre zone d'étude) et passerait à des argiles grisâtres vers l'est. La nappe serait artésienne sur une grande partie de la région excepté sur les bordures et au sud (PNUD, 1991). Elle s'écoulerait du nord-est vers le sud-ouest

(Abdoulkarimou, 1988 et Monfort, 1996). Greigert (1978) a émis des réserves quant au raccordement de cette formation avec celle du nord et du sud-est.

A part à l'ouest du dallol Bosso, la chimie des eaux de cet ensemble est mal connue. Elle se caractériserait par une faible minéralisation en ce qui concerne les domaines nord et sud-est, entre 200 et 300 mg.l<sup>-1</sup>, qui présenteraient respectivement des faciès bicarbonaté-sodique et chloruré sulfaté sodique (Greigert, 1978).

Pour les sables moyens à grossiers de l'ouest du dallol Bosso, les analyses chimiques ont montré une minéralisation plus importante de l'ordre de 900 mg.l<sup>-1</sup> et un faciès bicarbonaté sulfaté sodique. Le pH est généralement neutre à légèrement basique. Les analyses isotopiques témoignent de condition de recharge plus humide et plus froide qu'actuellement. Les datations au carbone 14 ont mis en évidence des temps de résidence élevé entre 24 000 et 35 000 ans. Ces résultats doivent toutefois être relativisés car des études minéralogiques ont révélé des traces de minéraux carbonatés dans la matrice et les épontes de l'aquifère (Le Gal La Salle, 1994).

### **1-3-2-2 Les sables moyens**

Selon Greigert (1978), cet aquifère apparaîtrait comme une dérivation du système phréatique et s'individualiserait seulement à l'est et au centre du synclinal. Il est principalement constitué de sables fins à moyens sur une épaisseur variant de 25 à 50 m. Cette nappe repose sur les argiles grises à lignite. Le toit est formé par les niveaux argileux de la base du CT3. A l'exemple des sables inférieurs, cet aquifère serait captif mais il ne présenterait pas d'artésianisme. Il serait alimenté sur les périphéries du bassin et drainé par le système phréatique au niveau des bas dallols Bosso et Maouri (Greigert, 1978). La chimie de ces eaux serait caractérisée par une faible minéralisation et un faciès bicarbonaté sodique ou calcique.

A l'ouest du dallol Bosso, les sables moyens disparaissent et sont remplacés par l'aquifère des oolithes ferrugineuses (Abdoulkarimou, 1988). Ces deux nappes ne seraient toutefois pas en continuité. Cet aquifère est formé de grains oolithiques emballés dans une matrice silto-argileuse plus ou moins consolidée. L'épaisseur de cette formation est très variable et peut aller de 2 à plus de 12 m. Le toit et le mur de ces oolithes sont formés par les argiles grises à lignite (CT2 lithologique) du moins sur la majeure partie du degré carré de Niamey (Monfort, 1996). Sur le peu d'information concernant la piézométrie, on peut dire que l'aquifère est captif et que la surface piézométrique présenterait un niveau supérieur à la nappe phréatique mais inférieur à l'aquifère des sables inférieurs. A l'heure actuelle, la chimie de cet aquifère est très mal connue.

### **I-3-2-3 Le système phréatique**

Le système phréatique est constitué d'un ensemble de lentilles de sables à granulométrie variable et de formation silteuse à silto-argileuse appartenant à la formation lithologique du CT3. Ce système formerait un ensemble apparemment en continuité hydraulique sur toute l'étendue du Continental Terminal sous la forme d'une nappe libre. La présence de lentilles argileuses peut cependant localement la mettre légèrement en charge. A l'ouest du fleuve la nappe est contenue dans une formation oolithique peu épaisse surmontant les altérites du socle. La question de l'épaisseur de la nappe phréatique a souvent été posée et s'est heurtée à la

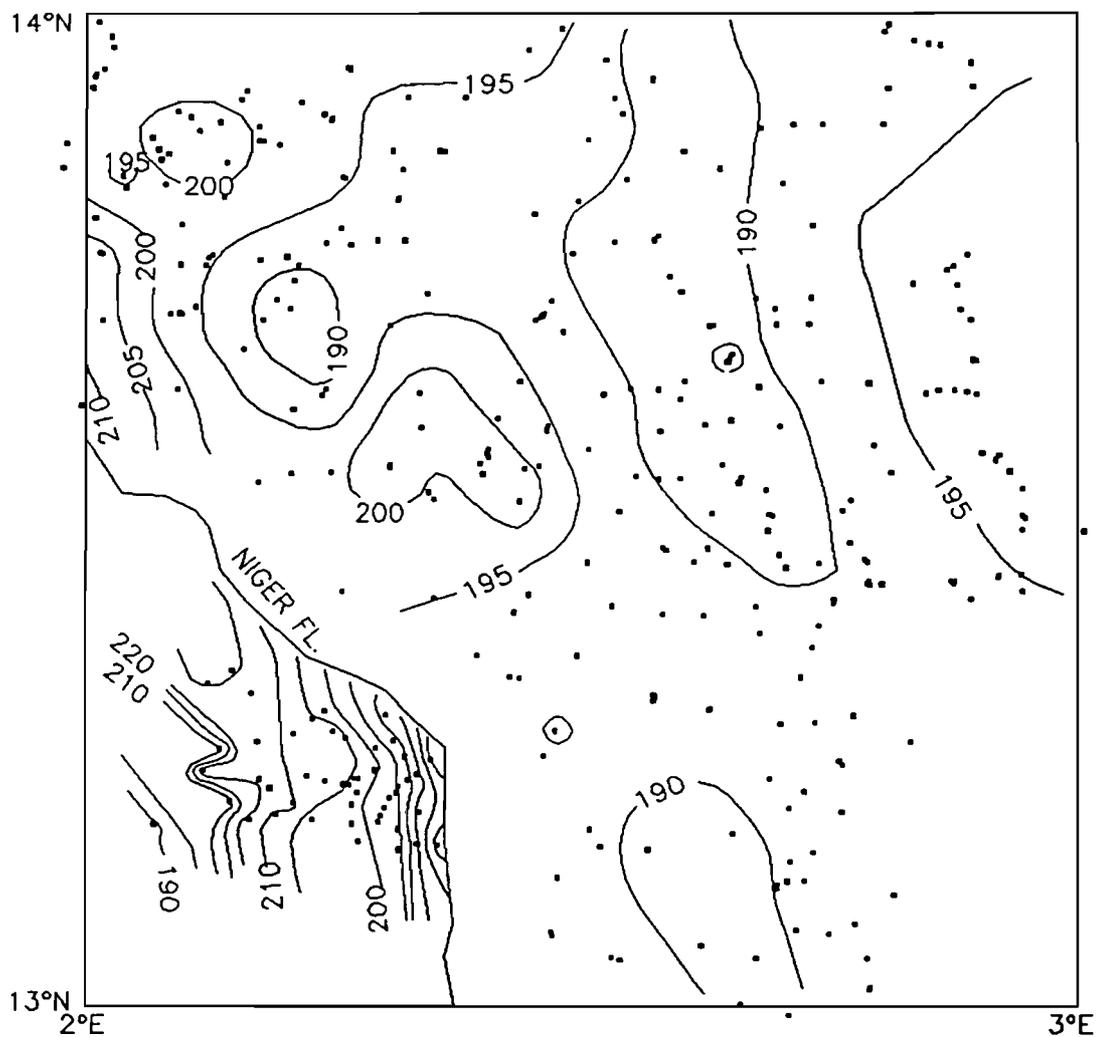


fig. 10 : Carte piézométrique de la nappe phréatique sur le degré carré de Niamey  
Niveaux statiques de septembre 1993 (Leduc et al., 1997)

complexité de la lithologie du CT3 caractérisé par des contrastes brutaux aussi bien horizontaux que verticaux. De manière générale, on peut dire que la puissance des horizons sableux varie entre 20 et 50 mètres.

L'étude piézométrique menée de façon précise par Leduc et al. (1997) sur le degré carré de Niamey a défini les caractères suivants (fig. I-10) :

- La nappe phréatique est hydrauliquement déconnectée de part et d'autre du fleuve, ce dernier coulant directement sur le socle.
- Aucune direction régionale d'écoulement ne peut être mise en évidence. La surface piézométrique est plutôt plate et semble décrire des écoulements sans exutoires privilégiés.
- Au nord-ouest, dans notre zone d'étude apparaît un gradient hydraulique plus élevé. Ce secteur présente les niveaux piézométriques les plus élevés du degré carré (210 m).
- La surface piézométrique offre une large dépression fermée au centre nord du degré carré caractéristique des nappes dites "en creux" typiques de la zone sahélienne. Ces structures hydrogéologiques semblent pouvoir s'expliquer par un déficit infiltration/évaporation dans la zone non saturée et ce sur de longue période (Aranyossy et al., 1989 ; Ndiaye et al., 1993).

Selon Greigert (1978), la chimie du système phréatique se distinguerait par une faible minéralisation,  $300 \text{ mg.l}^{-1}$ , un peu plus élevée que celles de la nappe des sables inférieurs des domaines nord et sud-est. Le faciès serait de manière générale bicarbonaté sodique.

Les études chimiques et isotopiques faites lors du programme HAPEX-Sahel ont permis de préciser les caractéristiques de cette nappe sur le degré carré de Niamey. La nappe présente une faible conductivité électrique : valeur médiane de  $130 \mu\text{S.cm}^{-1}$ . Son pH est acide et son faciès varie entre un pôle bicarbonaté sodique et un pôle nitraté sodique. Les teneurs isotopiques sont moins négatives que pour les sables inférieurs et s'inscrivent dans l'intervalle des valeurs correspondant aux précipitations (Leduc et Taupin, 1997). Ceci ajouté aux teneurs en tritium de 0,8 à 20 UT (Leduc et al., 1996) confirme le renouvellement actuel de l'aquifère.

Dans le Dallol Bosso, des conductivités plus importantes et des teneurs isotopiques enrichies témoigneraient d'une reprise évaporatoire, la nappe étant plus proche du sol dans cette zone.

Comme nous l'avons déjà vu, la recharge de la nappe phréatique s'effectue principalement à travers les bordures perméables des mares endoréiques temporaires, qui concentrent l'eau de pluie ruisselée. A l'ouest du fleuve, l'infiltration pourrait se faire directement dans le lit des rivières temporaires sans l'intermédiaire des mares (Leduc et al., 1997).

### **I-3-2 Terminologie**

Synthétisant toutes les informations antérieures à 1990, et s'appuyant sur l'analyse lithologique de Greigert, le rapport PNUD (1991) a adopté la terminologie suivante pour désigner les trois systèmes aquifères en présence dans le Continental Terminal :

#### aquifère du CT1

Cet aquifère désignerait les **sables inférieurs** de Greigert appartenant à la formation sédimentaire du CT1. Par abus de langage, elle engloberait la série inférieure des **sables**

**moyens à grossiers blancs** rencontrée à l'ouest du Dallol Bosso et supposée appartenir à la série lithologique du CT2 (Abdoulkarimou, 1988; Monfort, 1996). Cependant aucune hypothèse n'a été faite sur les relations entre cette série et les sables inférieurs de Greigert.

#### aquifère du CT2

Ce terme regrouperait les **sables moyens** de Greigert rencontrés au centre du bassin et l'aquifère des **oolithes** de la région ouest appartenant tous deux à la formation lithologique du CT2 mais apparemment sans communication.

#### aquifère du CT3

Cette expression est employée pour désigner le système de la **nappe phréatique**.

***Chapitre II :***  
***Caractérisation chimique***  
***des aquifères***



Ce chapitre a pour objectif la présentation des caractéristiques hydrochimiques générales des différents aquifères rencontrés dans la zone d'étude. Les résultats permettront de déceler d'éventuelles relations entre les différentes nappes en présence. et d'argumenter les discussions géologiques et hydrodynamiques des chapitres suivants.

Enfin, quelques remarques seront faites sur l'origine de la minéralisation sans toutefois prétendre à un exposé exhaustif de la question.

## **II-1 DONNEES DISPONIBLES**

### **II-1-1 Origine des données**

Pour cette étude, ont été utilisés les résultats des analyses chimiques et isotopiques faites lors des différentes campagnes d'échantillonnages du programme Hapex-Sahel. Ces campagnes se sont déroulées sur une période allant de 1992 à 1995.

Afin de compléter ce jeu de données, une série d'échantillons supplémentaires a été prélevée au cours du mois de décembre 1996 par le centre ORSTOM de Niamey. Les analyses chimiques ont été effectuées par le laboratoire du CIRAD de Montpellier. Les analyses isotopiques ont été réalisées dans la première partie du stage entre les mois de février et mars 1997 au sein du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique d'Orsay.

En définitive, nous disposons de 70 prélèvements soit 53 prélèvements pour la nappe phréatique et 17 prélèvements pour les aquifères profonds. Pour ces derniers, 2 échantillons ont été pris sur le pourtour extérieur de la zone d'étude et ne figurent pas sur la carte de localisation (fig II-1). L'ensemble des prélèvements est assez bien réparti sur la zone d'étude, excepté pour les aquifères profonds qui sont plutôt concentrés dans la partie est.

L'ensemble de ces résultats est reporté dans les tableaux 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 situés en annexe I.

Il existe également un nombre important d'analyses chimiques réalisées lors du creusement des forages. La validité de ces analyses est relative. Les conductivités et les quantités en ions majeurs sont parfois contradictoires. Les balances ioniques ne sont pas toujours satisfaites. Sur les forages où il est possible de comparer avec des analyses faites postérieurement, on constate parfois des différences notoires. Par manque de temps pour rectifier ces erreurs, ces analyses n'ont pas été prises en considération dans cette partie.

Ces données seront toutefois utilisées dans les discussions abordées dans les chapitres suivants, notamment pour fournir des indices sur le degré de minéralisation de certaines zones. Lorsque les conductivités et les quantités en ions majeurs sont contradictoires, les conductivités ont été reconstituées à partir des concentrations en ions.

### **II-1-2 Critique des données**

Le nombre de prélèvements disponibles peut paraître honorable pour une telle étude. Cependant avant toute chose, il est nécessaire de préciser les différents problèmes et les carences qui entachent ce jeu de données et qui pourraient par la suite limiter les interpolations. Les problèmes rencontrés sont de trois types : le manque de rigueur au niveau des

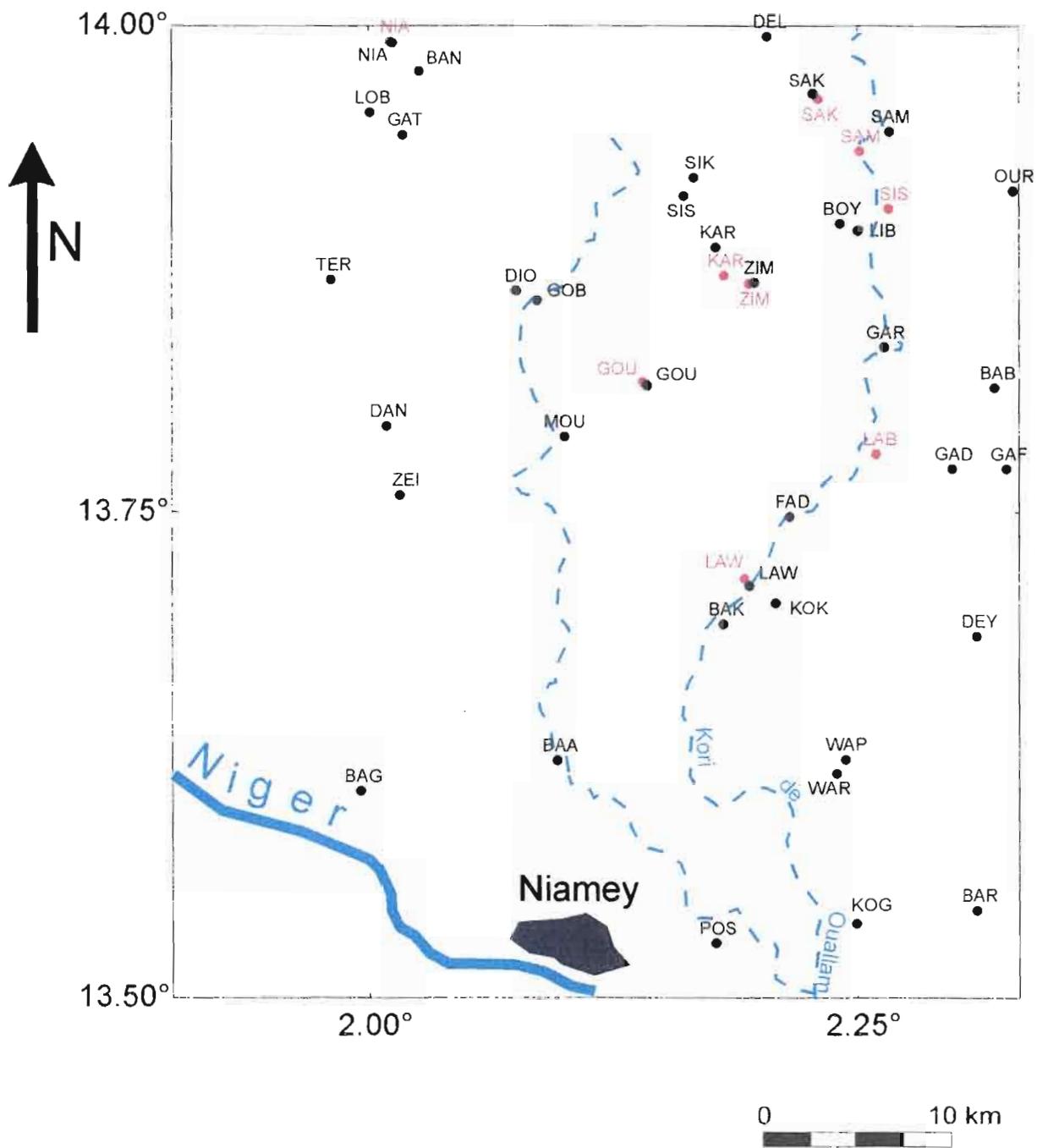


fig.II-1 : Localisation des points de prélèvements

Village



● prélèvements dans les puits et forages captant la nappe phréatique et dans les puits à forte minéralisation (groupe 3 (cf. II-2))

● prélèvements dans les forages captant les aquifères profonds

\* Se reporter à l'annexe IV pour l'abréviation des villages

prélèvements sur le terrain, la non-complémentarité des données chimiques et isotopiques, l'identification des aquifères captés.

### **II-1-2-1 Les prélèvements**

Un prélèvement sur le terrain doit toujours être accompagné de mesures de pH, de température et du TAC (Titre Alcalimétrique Complet) donnant accès à la concentration des différentes espèces du CITD de terrain (Carbone Inorganique Total Dissous). Or, ces conditions n'ont pas toujours été respectées :

- Les mesures de pH et de température sont absentes pour un certain nombre d'échantillons (6 échantillons pour le pH, 42 échantillons pour la température).

- La teneur en bicarbonate sur le terrain n'a été relevée que pour 17 échantillons.

Pour palier ce manque de données, nous avons essayé d'estimer le pH et la température de la façon suivante :

- pour le pH, nous avons pris les pH déterminés lors d'autres campagnes de mesure. Cette approximation est justifiée par le fait que le pH ne semble pas varier au cours de l'année (Leduc et Taupin, 1997).

- pour la température, dans un premier temps le même procédé a été appliqué. Le reste des températures a été estimé par une approximation de la valeur médiane pour la nappe phréatique et une moyenne pondérée pour les aquifères profonds.

En ce qui concerne le bicarbonate de terrain il n'est pas possible de façon rigoureuse de reconstituer sa valeur. Faute de mieux, la concentration mesurée en laboratoire sera donc utilisée. Sur les 15 échantillons où il est possible de faire une comparaison, on peut noter que l'approximation de la concentration en bicarbonate de terrain par la concentration mesurée en laboratoire engendre en moyenne une erreur de plus ou moins 12%. Le calcul des indices de saturation, avec uniquement les valeurs de terrain, a montré que l'approximation par le bicarbonate de laboratoire ne change pas fondamentalement les résultats du moins pour les eaux de la nappe phréatique (cf. annexe III).

### **II-1-2-1 Complémentarité des données chimiques et isotopiques**

Les données chimiques et isotopiques ne sont pas toujours complémentaires. Sur certains prélèvements, seules les analyses chimiques ont été faites et inversement sur d'autres prélèvements, seules les teneurs isotopiques ont été mesurées. De plus pour certains échantillons, nous ne connaissons que les teneurs en  $^{18}\text{O}$ . Ceci pose problème lorsque nous voulons croiser les données chimiques et les données isotopiques dans les différents traitements analytiques. Cependant le suivi de la conductivité semble indiquer que dans la majorité des cas, il n'y a pas de variation très sensible de la minéralisation au cours du temps, et qu'on peut donc relier des analyses chimiques à des analyses isotopiques faites à des dates différentes. Le nombre d'échantillons utilisables est tout de même réduit à 31.

### **II-1-2-2 Identification des aquifères**

Un des problèmes posés est d'identifier l'aquifère capté par l'ouvrage dans lequel est fait le prélèvement. Nous pouvons avoir à faire à trois types d'ouvrage : puits, forage et puits-forage.

Les puits-forages sont des ouvrages constitués de forages connectés à des réservoirs creusés dans le sol sous l'aspect d'un puits.

Les puits étant souvent peu profonds, il y a peu de chance pour qu'ils captent un aquifère profond. Sauf cas exceptionnel, les eaux prélevées à partir des puits proviennent donc de la nappe phréatique. Mais certains échantillons prélevés dans les puits présentent une forte minéralisation indicatrice des milieux profonds.

Les forages captent soit la nappe phréatique, soit un des aquifères profonds du Continental Terminal. A moins d'avoir la coupe du forage on ne peut déterminer a priori à quel aquifère appartient l'eau prélevée. Ainsi, sur les 25 prélèvements issus de forages ou de puits-forages, il n'a été possible de déterminer sûrement l'aquifère capté que pour 15 échantillons dont 12 provenant des aquifères profonds. Il existe des cas où les coupes indiquent le captage de deux aquifères à la fois. Les puits-forages captent tous des milieux profonds. Sur les 12 aquifères identifiés, seulement 6 forages captent les sables inférieurs, et un seul capte l'aquifère des oolithes seul.

## **II-2 ANALYSES STATISTIQUES**

Une classification hiérarchique ascendante a été réalisée. Ce type d'analyse permet de classer par affinité un ensemble d'individus en différents groupes. Deux classifications hiérarchiques ont été faites : une tenant compte des concentrations en ions majeurs, de la conductivité et du pH portant sur 50 échantillons, une autre incluant les mêmes paramètres plus les teneurs isotopiques en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  sur 31 échantillons. La partition de notre lot d'échantillons par affinité facilitera l'analyse chimique.

### **II-2-1 Première classification sur les paramètres chimiques**

La première classification permet d'identifier 3 groupes (fig. II-2a) :

**-groupe A** : Ce groupe contient 14 individus. Il est caractérisé par une forte minéralisation. Il contient des eaux prélevées essentiellement sur des forages, excepté pour les prélèvements de Fada Tokobinkani Zarma et de Moussa Diolo. Les forages dont l'aquifère capté est identifié pompent tous dans les nappes profondes. Ce groupe caractériserait donc les aquifères profonds du Continental Terminal sur notre zone.

**-groupe B** : Ce groupe est défini par 33 échantillons caractérisés par une faible minéralisation. Ils sont pour la plupart issus de puits, sauf pour les sites de Kone Kaïna forage et Samari Kaïna forage dont la coupe nous indique qu'il pomperait dans la nappe phréatique. Ce groupe caractériserait donc la nappe phréatique.

**-groupe C** : Il est composé de 4 individus : Libo Atou Kouara, Libo Atou Baba, Gata Kouara Tégui et Diolé Goubé. Ce groupe est fortement minéralisé voire très fortement minéralisé. Les échantillons ont été prélevés dans des puits.

### **II-2-2 Seconde classification sur les paramètres chimiques et isotopiques**

La seconde classification confirme en partie les résultats de la première. On retrouve globalement les mêmes ensembles : un groupe A fortement minéralisé, contenant les forages,

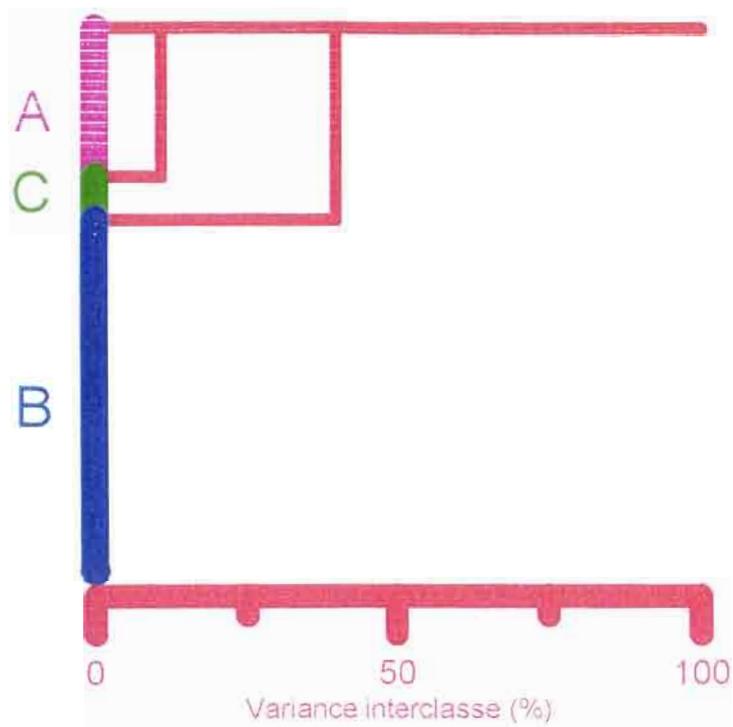


fig II-2a Résultats de la classification hiérarchique ascendante sur les paramètres chimiques

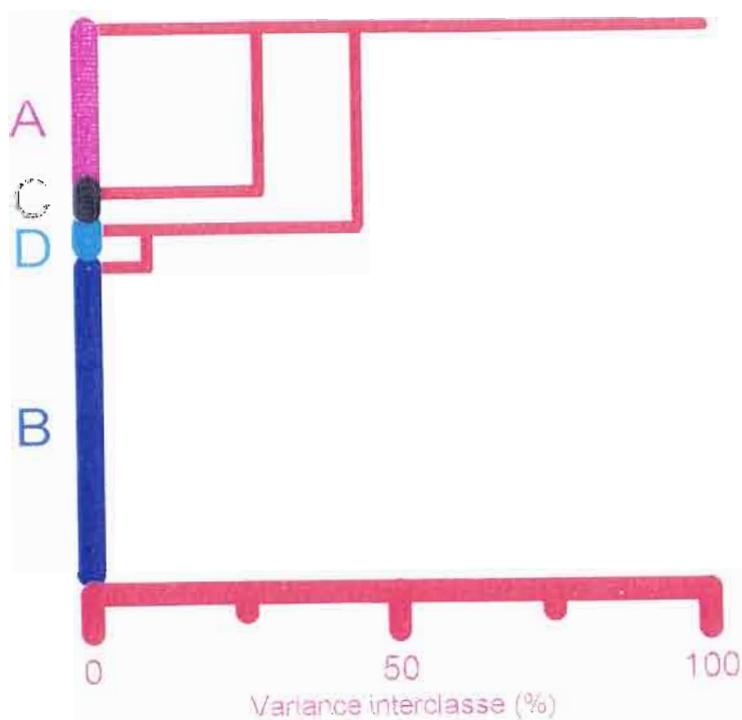


fig II-2b Résultats de la classification hiérarchique ascendante sur les paramètres chimiques et isotopiques

caractérisé par des compositions isotopiques plus négatives que celles du groupe B à faible minéralisation et constitué d'échantillons provenant essentiellement de puits (fig. II-2b).

Au sein de ces deux grands ensembles, on observe des sous-groupes : C et D formés de deux échantillons chacun et appartenant respectivement aux groupes A et B. Le sous-groupe C est formé des prélèvements de Libo Atou Kouara et de Gata Kouara Tegui, caractérisés par une très forte minéralisation. Le sous-groupe D est constitué des échantillons de Diolé Goubé Kouara et de Moussa Diolo présentant des conductivités élevées similaires à celles du groupe A. Leur position en tant que sous-ensemble du groupe B se justifie par le même faciès isotopique.

De part ce critère, l'échantillon de Moussa Diolo passe du groupe A au groupe D. Celui de Fada Tokobinkani reste dans le groupe A. En effet, son faciès isotopique le rapproche des aquifères profonds.

Les échantillons du groupe C ont la même signature isotopique que ceux du groupe B. On peut donc penser qu'ils sont des cas particuliers de la nappe phréatique. Mais ils se présentent curieusement comme un sous-groupe des aquifères profonds. Cette tendance s'expliquerait par le fait que les éléments du groupe C (Libo Atou Kouara et Gata Kouara Tégui) sont très fortement minéralisés (conductivités deux fois supérieures à celles du groupe A (cf. tab. 1 en annexe 1)) ce qui les rapprocherait plus statistiquement du groupe A.

En conclusion, grâce aux seuls paramètres physico-chimiques, chimiques et isotopiques, on est capable de distinguer les eaux provenant des divers aquifères du Continental Terminal. Il est possible d'ores et déjà de distinguer trois grands ensembles :

- un **groupe 1** qui représenterait l'ensemble des aquifères profonds,
- un **groupe 2** auquel correspondraient les eaux de la nappe phréatique,
- un **groupe 3**, réunion des sous-groupes C et D, contenant des échantillons prélevés dans les puits, à forte minéralisation et à faciès isotopique le rapprochant du groupe 2. L'échantillon de Fada Tokobinkani Zarma sera traité avec ce groupe car il a été prélevé dans un puits.

## **II-3 CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES**

Dans cette partie, on s'appliquera à faire la distinction des caractères des aquifères profonds, de l'aquifère superficiel de la nappe phréatique et des eaux du groupe 3. Dans les parties traitant des nappes profondes, après un point de vue général, une discussion sera faite sur les caractéristiques des différents aquifères essentiellement pour les sables inférieurs, les deux autres aquifères n'étant représentés que par un seul forage : Karey Bangou Lori Kouara pour les oolithes et Lawey pour le socle.

Avant d'entamer ce chapitre, notons cette remarque. La plupart des variables physico-chimiques, chimiques et isotopiques présentent des distributions asymétriques dans les diagrammes de fréquence. De ce fait le paramètre statistique central utilisé sera la médiane.

## II-3-1 Paramètres physico-chimiques

### II-3-1-1 Conductivité

#### Les nappes profondes

Les aquifères profonds sont caractérisés par une forte conductivité : médiane de  $1380 \mu\text{S.cm}^{-1}$  et des valeurs extrêmes allant de  $628$  à  $1476 \mu\text{S.cm}^{-1}$  (fig. II-3a). Ces eaux sont donc nettement plus minéralisées que celles de la nappe phréatique.

Les eaux des sables inférieurs ont une valeur médiane identique, aux erreurs de mesure près, à l'ensemble des aquifères profonds,  $1377 \mu\text{S.cm}^{-1}$ , mais sont moins dispersées, de  $1033$  à  $1442 \mu\text{S.cm}^{-1}$ . Ces valeurs sont concordantes avec celles provenant d'échantillons prélevés plus à l'ouest de notre zone : moyenne de  $1340 \mu\text{S.cm}^{-1}$  (Le Gal La Salle, 1994).

Le seul prélèvement disponible sur l'aquifère du socle (forage de Lawey) donne une conductivité de  $628 \mu\text{S.cm}^{-1}$  ce qui conférerait à cette aquifère une minéralisation moyenne.

Le forage de Karey Bangou (aquifère des oolithes) présente une conductivité dans les gammes de celles des sables inférieurs :  $1370 \mu\text{S.cm}^{-1}$ .

#### Nappe phréatique

La conductivité des eaux de la nappe phréatique est peu élevée, avec une médiane de  $198 \mu\text{S.cm}^{-1}$  et des valeurs extrêmes de  $30$  et  $501 \mu\text{S.cm}^{-1}$  (fig. II-4a). La médiane est supérieure à celle de l'ensemble du degré carré :  $130 \mu\text{S.cm}^{-1}$  (Leduc et Taupin, 1997). Les eaux pourraient donc être de façon générale plus minéralisées dans le nord-ouest du degré de Niamey.

Un bon nombre d'échantillons ont des conductivités comprises dans la gamme de celles des eaux de pluie qui se situent entre  $5$  et  $70$  sur l'année 1992 à la station de Niamey ORSTOM (Taupin et al., 1997).

#### Eaux du groupe 3

Les eaux du groupe 3 ont des conductivités élevées à très élevées de  $715$  à  $6780 \mu\text{S.cm}^{-1}$  (tab. 1 en annexe 1). Ces valeurs dépassent parfois très largement celles des aquifères profonds.

### II-3-1-2 pH

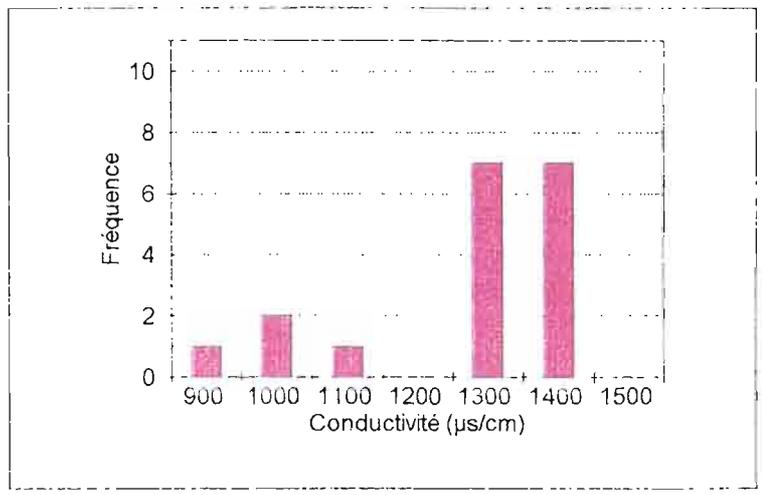
#### Les nappes profondes

Les eaux des aquifères profonds présentent majoritairement des pH légèrement basiques avec une valeur médiane de  $7,3$  (fig II-3b). Cependant 2 forages donnent des eaux légèrement acides : les forages de Gounou Bangou et de Laboutitiloua F2. Les coupes montrent que ces forages sont crépinés à deux niveaux : dans l'aquifère des sables inférieurs et dans un niveau argileux à oolithes qui pourrait être assimilé à l'aquifère des oolithes.

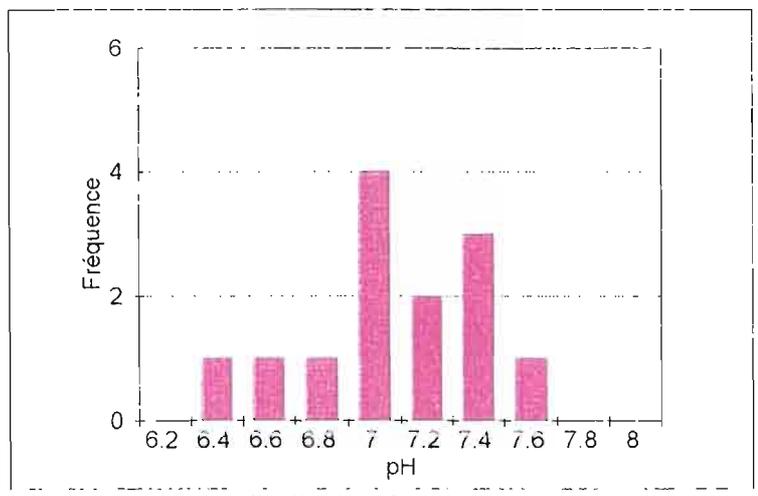
Les sables inférieurs ont un pH basique. La valeur médiane est légèrement supérieure ( $7,5$ ) mais la gamme de variation reste la même.

#### Nappe phréatique

Les eaux de l'aquifère du CT3 sont acides avec un pH variant de  $4,9$  à  $7,0$  pour une valeur médiane de  $6,2$ . Une seule valeur est inférieure à  $5$  et seulement cinq échantillons ont un pH supérieur à  $6,5$  sur 48 prélèvements effectués (fig II-4b). Le pH de ces eaux reflète à peu près les valeurs fournies sur l'ensemble du degré carré de Niamey (Leduc et Taupin, 1997).

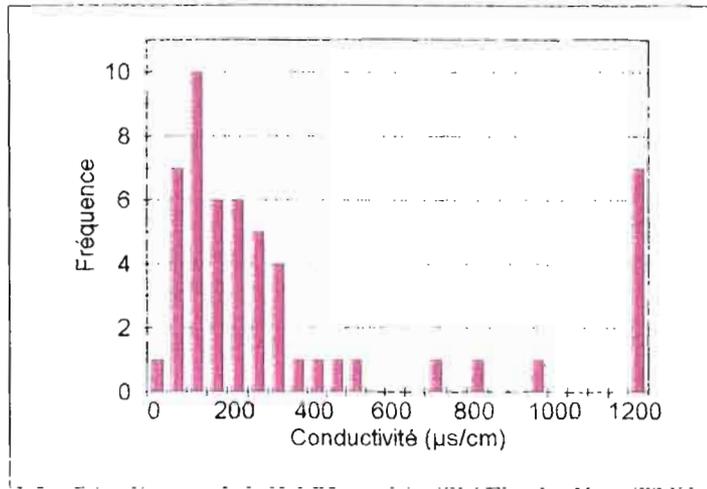


a : distribution des conductivités

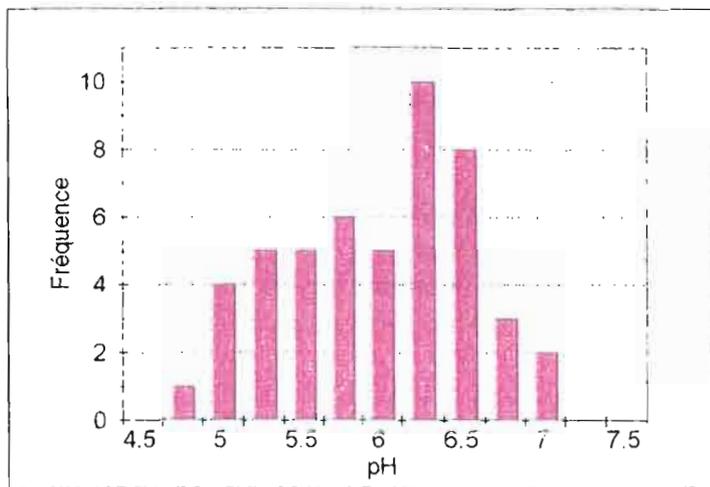


b : distribution des pH

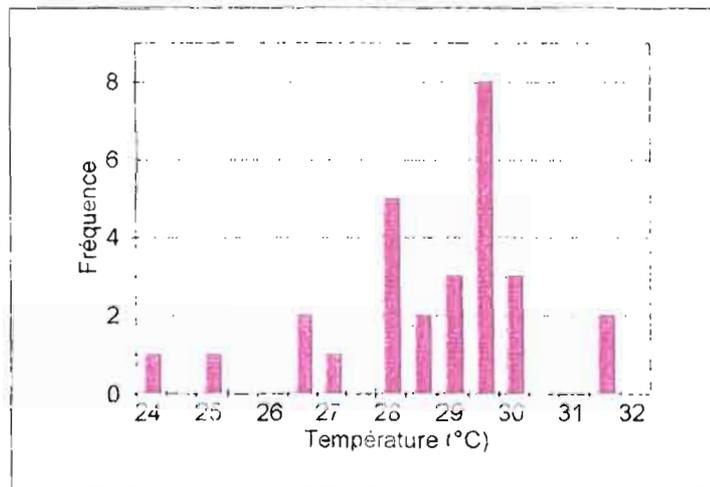
fig II-3 : Diagramme de fréquence des paramètres physico-chimiques des aquifères profonds du Continental Terminal



a : distribution des conductivités



b : distribution des pH



c : distribution des températures

fig II-4 : Diagramme de fréquence des paramètres physico-chimiques de la nappe phréatique

### Eaux du groupe 3

Les eaux de ce groupe ne montrent pas de tendance franche. Cinq échantillons ont des pH légèrement acides voire neutres de 6,4 à 7,1, et seulement trois ont des pH franchement acides de 5,3 à 5,6. Il ne semble pas y avoir de relations entre le pH et la conductivité.

### **II-3-1-3 Température**

#### Les nappes profondes

Les rares mesures faites sur la zone d'étude montrent que les températures des aquifères profonds restent dans les mêmes gammes de variation que celles relevées sur la nappe phréatique. Plus à l'ouest du degré carré, l'aquifère du CT1 montrerait des températures plus élevées (Le Gal La Salle, 1992). Dans cette région le CT1 se situerait à une profondeur plus importante. L'augmentation de température correspondrait à une augmentation du gradient géothermique.

#### Nappe phréatique

Les températures ont une valeur médiane de 29,3°C et s'étalent de 24,0 à 31,1°C (tab. 5). Mais ces valeurs extrêmes sont exceptionnelles, la majorité des eaux ayant une température comprise entre 28 et 30°C (fig. II-4c). Ces valeurs reflètent la température annuelle atmosphérique de la station de Niamey (cf. I-1-1-2).

### Eaux du groupe 3

Les eaux du groupe 3 restent dans les mêmes gammes de température.

Conclusion : Le pH et la conductivité électrique semblent être de bons critères de différenciation entre les aquifères profonds et la nappe phréatique. En ce qui concerne les échantillons du groupe 3, le pH ne semble pas les différencier de la nappe du CT3. Les conductivités sont, soit semblables aux aquifères profonds, soit nettement plus élevées.

La température n'est pas un paramètre discriminant pour les différents types d'eaux rencontrées dans la zone d'étude.

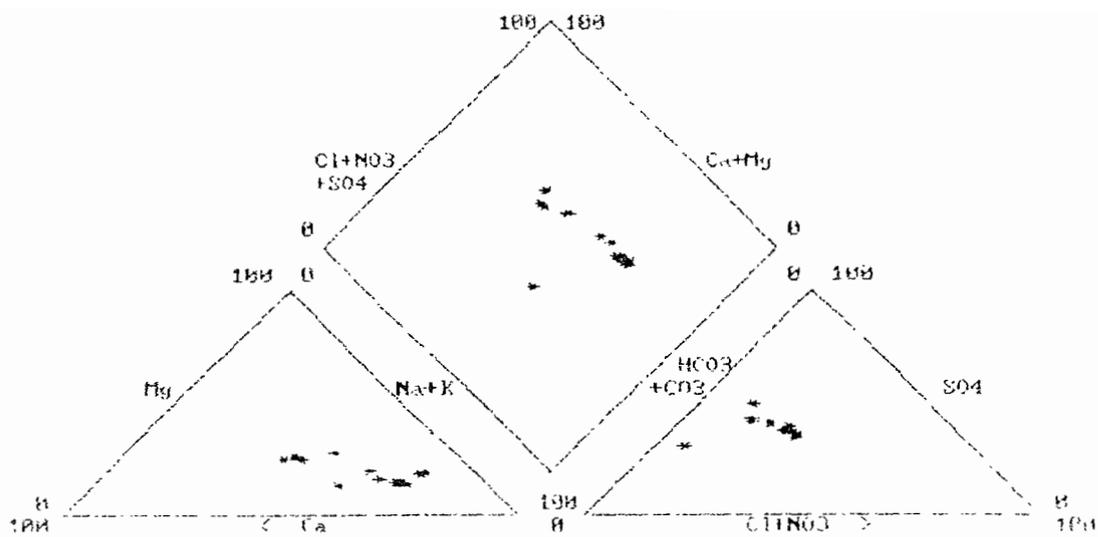
## **II-3-2 Caractéristiques chimiques des eaux**

### **II-3-2-1 Faciès hydrochimiques**

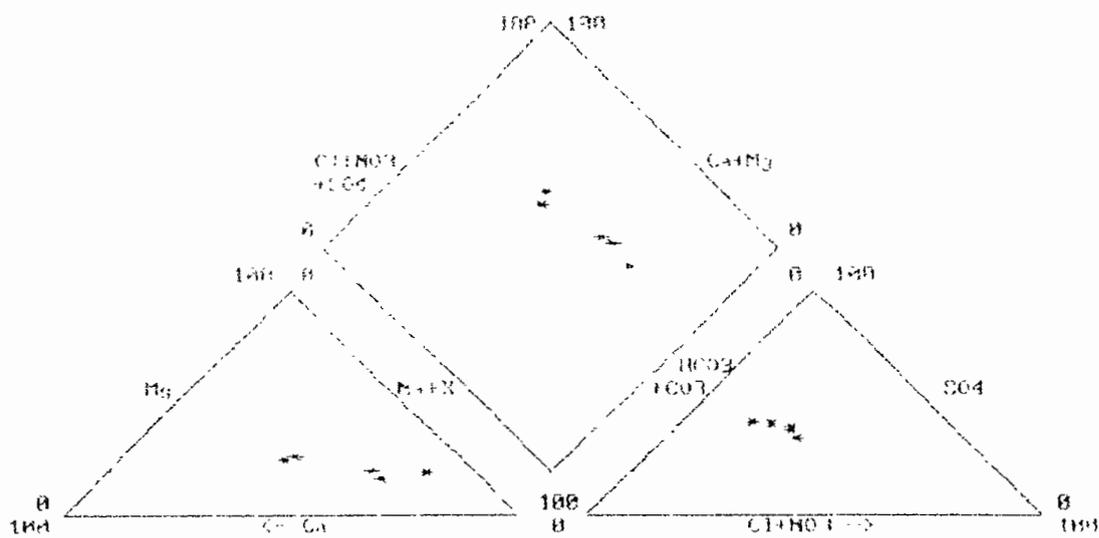
#### Les nappes profondes

Les eaux des aquifères profonds sont réparties de façon très homogènes dans le diagramme de Piper (fig. II-5a). Le chimisme de ces eaux varie entre un faciès sulfaté et bicarbonaté calco-sodique à sodique. Seul l'échantillon de Lawey se détache du groupe.

Le faciès cationique est représenté essentiellement par le sodium et le calcium, 40 à 70% pour le sodium, 10 à 40% pour le calcium et seulement 10 à 20% pour le magnésium. Le rapport moyen entre sodium et calcium, 3,6, reste tout de même élevé. On observe une évolution d'un pôle calco-sodique à un pôle sodique.



a : Pour les eaux des nappes profondes



b : Pour les eaux des sables inférieurs

fig II-5 Diagramme de Piper pour les eaux des aquifères profonds du Continental Terminal

Cette tendance peut être due :

- soit à un échange de base,
- soit à une dissolution de silicate sodique,
- soit à un mélange avec des eaux chlorurées sodiques,
- soit à une dissolution de halite.

Dans le diagramme  $\text{Cl}^-$  vs  $\text{Na}^+$  on observe un excès de sodium par rapport au chlorure (fig. II-6). En outre le diagramme  $\text{Na}^+$  vs  $\text{Ca}^{2+}$  montre, en dehors des échantillons de Lawey et de Niabéri Kouara, une tendance à la décroissance (fig. II-7). Cette évolution signifie qu'une augmentation en sodium s'accompagne d'une diminution en calcium. Ces deux arguments renforceraient l'hypothèse de l'échange de base.

Cependant, en toute rigueur si nous avons affaire à un échange de base seul, les points devraient s'aligner selon une pente -1 dans le diagramme calcium-sodium. Hors les échantillons s'alignent selon une droite de pente -0,7 (15 points,  $r^2 = 0,94$ ). De plus deux points sont franchement en dehors de la corrélation dont l'échantillon de Lawey, ce qui n'est pas surprenant puisqu'il appartient au socle. Si l'échange de base existe, il peut être parasité par d'autres phénomènes.

En outre, pour valider cette hypothèse, il faudrait mettre en relation le phénomène avec le temps de séjour, vérifier par exemple, que le rapport calcium sur sodium décroît le long d'une ligne de flux.

Cette évolution n'a pas son équivalent dans le triangle des anions. Hormis l'échantillon SO, les eaux présentent un faciès anionique très homogène. Il est définie à part égale par le bicarbonate et le soufre, 80% de la minéralisation, les 20% restants étant attribués au chlorure. Proportionnellement aux concentrations des autres anions les teneurs en nitrate sont faibles (tab. 5).

Dans le diagramme de Piper, les eaux reconnues comme appartenant à l'aquifères des sables inférieurs ne se distinguent pas de l'ensemble des autres échantillons du CT profond (fig. II-5b). Les eaux analysées à l'ouest de notre zone sur le CT1 (in Le Gal LaSalle, 1994) présente un faciès sulfaté et bicarbonaté sodique plus proche du pôle sodique que nos échantillons.

### Nappe phréatique

Le faciès des eaux de la nappe phréatique est beaucoup plus variable que celui des aquifères profonds. Il va d'un faciès bicarbonaté calcique à nitraté calcique et sodique (fig II-8).

Dans le triangle des cations, les points sont assez regroupés. Le faciès cationique est essentiellement défini par le sodium et le calcium, les proportions de ces deux éléments variant de 20 à 80% pour le sodium et 20% à 60% pour le calcium soit à eux deux 70 à 90% du faciès cationique. La répartition entre les deux éléments est assez équitable. Le rapport moyen entre ces deux cations ( $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ ) est de 1,19.

Dans le triangle des anions, la majorité des points s'étale entre le pôle bicarbonaté et le pôle nitraté. Le nitrate et le bicarbonate représenteraient à eux seuls 90% du faciès anionique. Seulement cinq échantillons ont du sulfate en proportion non négligeable (20 à 40%).

On peut s'interroger sur l'origine des nitrates qui confèrent au eaux de la nappe phréatique un faciès peu commun. Il est exclu que ces nitrates soient uniquement d'origine anthropique. La zone d'étude se situe en milieu rural dans un pays en voie de développement, ce qui exclue la pollution urbaine et industrielle. De plus l'agriculture est encore pratiquée de façon

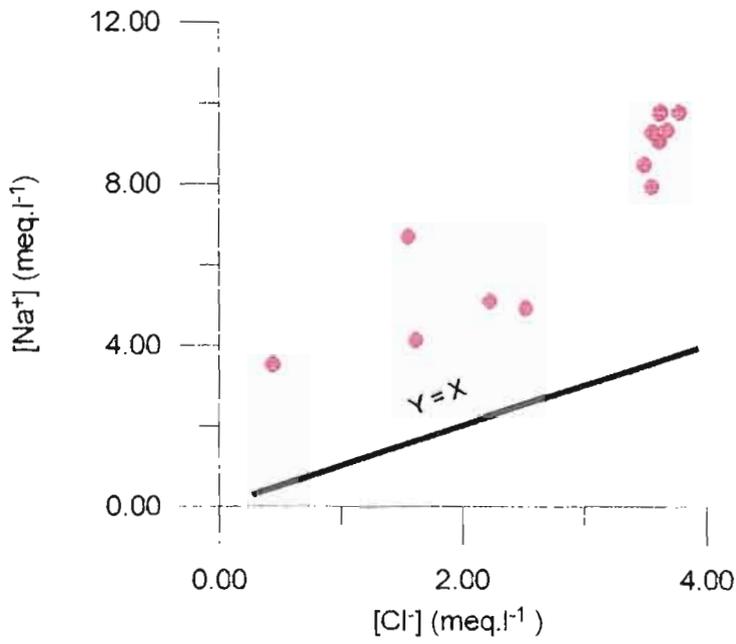


fig. II-6 : Variation du sodium en fonction du chlorure dans les nappes profondes

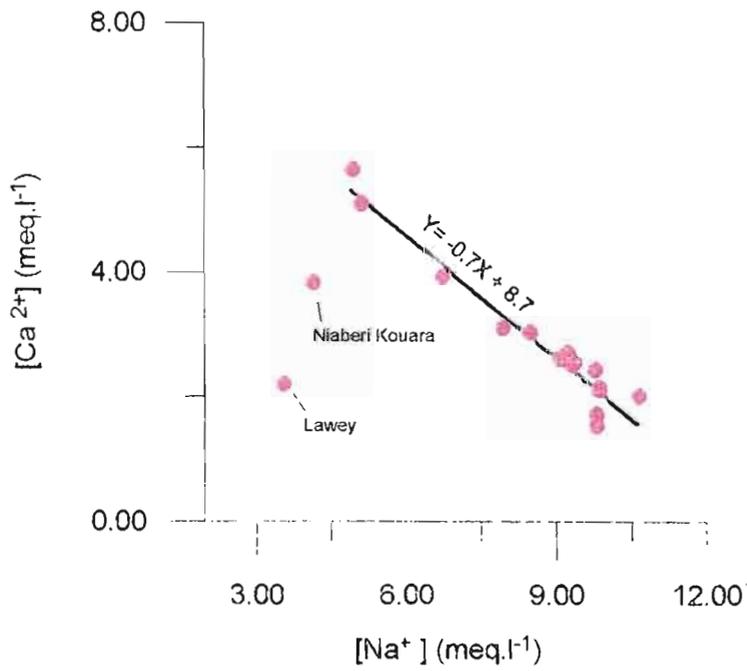


fig.II-7 : Variation du calcium en fonction du sodium dans les nappes profondes

traditionnelle fonctionnant sous le principe des jachères (Leduc et Loireau, 1997). L'apport d'engrais azoté est donc négligeable voire nul.

La présence de nitrate pourrait plutôt être liée à une origine biogénique : production de résidus azotés par l'activité biologique au niveau des termitières. Ces résidus subiraient une oxydation bactériologique. Les nitrates issus de cette oxydation seraient lessivés et entraînés vers la nappe par les eaux d'infiltration (Barnes et al. 1992).

### Eaux du groupe 3

Les eaux fortement minéralisées ont un faciès chimique différent. Les prélèvements de Gata Kouara Tegui (A3), Libo Atou Baba (A4), Libo Atou Kouara (A5) et Moussa Diolo (A6) ont un faciès sulfaté calcique (fig. II-9).

Les eaux échantillonnées sur les puits de Diolé Goubé (A1) et de Fada Tokobinkani Zarma 2 (A2) s'individualisent de ce groupe. Le prélèvement de Fada Tokobinkani Zarma 2 présente un faciès sulfaté sodique. La proportion de bicarbonate y est plus importante que dans les autres échantillons, entre 30 et 35%. Ceci rapproche le prélèvement de Fada Tokobinkani Zarma 2 du faciès des aquifères profonds.

Le prélèvement de Diolé Goubé (A1) montre un faciès nitraté et chloruré potassique. En fait, il présente des caractéristiques chimiques très particulières par rapport à ce qui est connu sur l'ensemble de la zone. En effet, les proportions en bicarbonate, nitrate et chlorure sont presque identiques (respectivement 2,24, 1,92, et 2,00 meq.l<sup>-1</sup>). De fait, le faciès de ses eaux est mal représenté dans le diagramme de Piper.

**Conclusion** : On peut remarquer qu'il est difficile de différencier les différents types d'eaux par leur faciès cationique. En revanche, le faciès anionique marque bien la distinction entre les trois types d'eaux. Les eaux du groupe 3 sembleraient avoir un faciès propre à chaque échantillon. Par leur faciès, les eaux de Fada Tokobinkani se rapprochent plus des eaux des aquifères profonds.

### **II-3-2-2 Gamme de concentrations**

Elles sont résumées par les tableaux suivants :

#### Les nappes profondes

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	meq.l <sup>-1</sup>							
Médiane	2,59	2,07	9,05	0,25	5,10	3,55	5,11	0,01
Minimum	1,52	0,26	3,52	0,06	4,20	0,43	2,03	0,00
Maximum	5,63	4,14	10,61	0,34	6,00	3,78	6,67	0,37

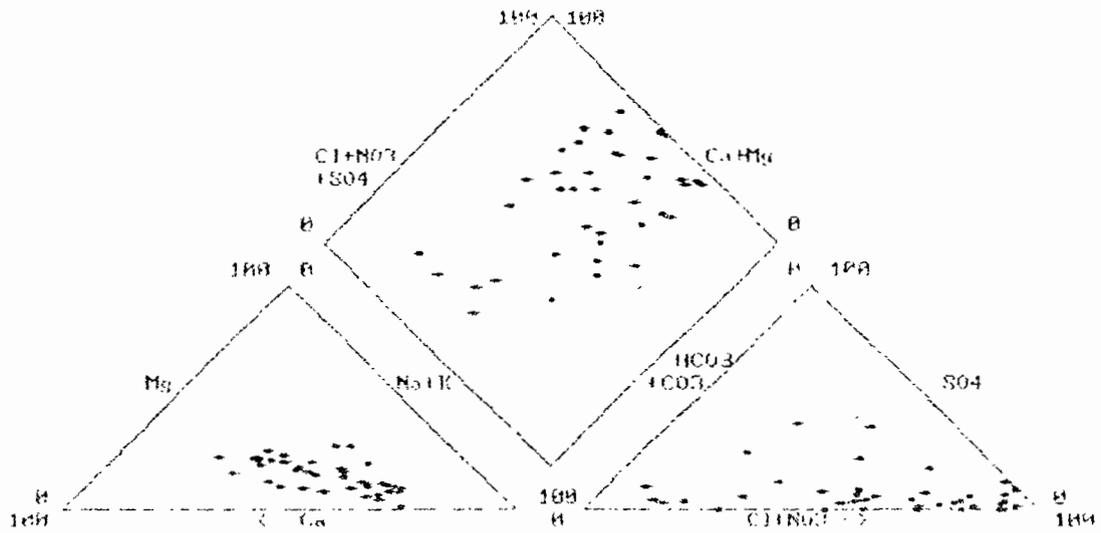


fig II-8 : Diagramme de Piper pour les eaux de la nappe phréatique

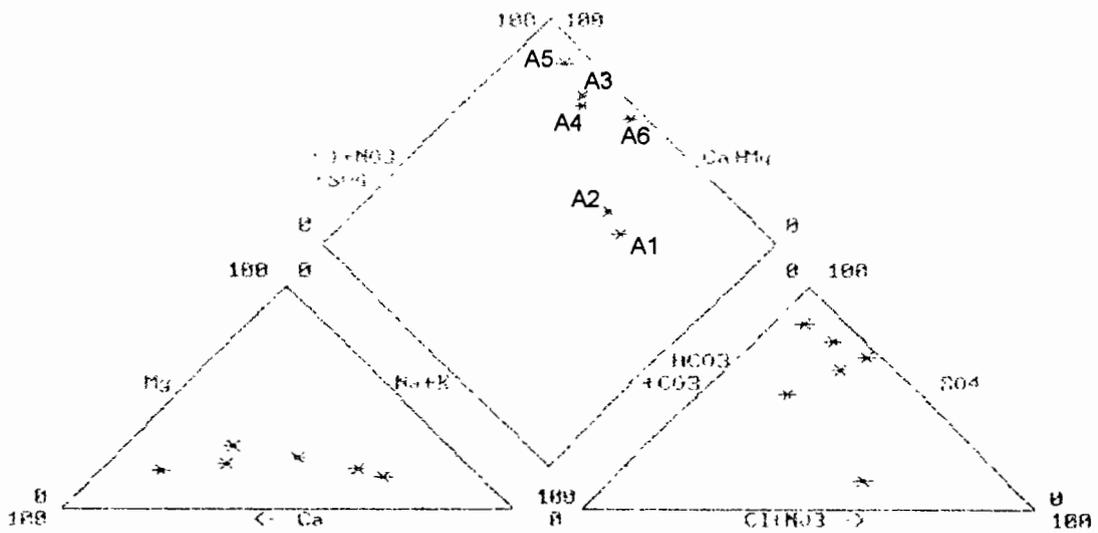


fig II-9 : Diagramme de Piper pour les eaux du groupe 3

### Nappe phréatique

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	meq.l <sup>-1</sup>							
Médiane	0,52	0,24	0,62	0,08	0,37	0,15	0,07	0,62
Minimum	0,13	0,02	0,09	0,00	0,02	0,03	0,00	0,01
Maximum	1,54	0,78	2,67	0,84	1,77	0,71	1,09	3,24

### Eaux du groupe 3

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	meq.l <sup>-1</sup>							
DIOLE GOUBE K.	1,52	0,99	0,85	3,63	2,24	2,00	0,92	1,92
FADA TOKOBIN. Z	6,28	4,40	13,45	0,27	7,01	4,47	12,23	0,16
GATA KOUARA T	15,86	9,44	7,97	0,21	3,21	0,72	27,23	1,76
LIBO ATOU BABA	18,40	6,92	8,13	1,21	3,85	2,13	19,79	6,04
LIBO ATOU K.	35,93	8,91	5,46	1,38	3,27	1,99	33,78	5,99
MOUSSA DIOLO	5,17	3,29	5,72	0,08	0,51	1,26	9,46	2,75

Hormis les concentrations en nitrate et en potassium, les aquifères profonds et la nappe phréatique varient dans des gammes de teneurs bien différenciées. Excepté le puits de Diolé Goubé, les eaux du groupe 3 ont des teneurs, soit dans les gammes des aquifères profonds, soit nettement plus élevées.

### **II-3-2-3 Etat de saturation des eaux vis à vis des différents minéraux**

Les indices de saturation et les diagrammes de stabilité ont été respectivement calculés et établis par le logiciel AQUA. Les valeurs des indices de saturation se situent en annexe II.

#### Les nappes profondes

De manière générale, les échantillons sont saturés à légèrement sous-saturés vis à vis de la calcite (fig. II-10), saturés à légèrement sursaturés vis à vis de la dolomite (fig. II-11) et franchement sous-saturés vis à vis du gypse (fig. II-12).

Seuls les échantillons S4 et S5 qui correspondent aux prélèvements effectués au forage de Zimba paraissent légèrement sursaturés vis à vis de la calcite et plus sursaturés vis à vis de la dolomite. Gounou Bangou (SK) s'individualise du groupe dans les diagrammes de stabilité de la calcite et de la dolomite, et est plus franchement sous-saturé vis à vis de ces deux minéraux. L'échantillon de Niabéri (P2) se situe sur la droite de saturation de la calcite. Les prélèvements de Lawey (SO) et de Karey Bangou (S2 et S3), seuls échantillons à être identifiés comme eaux respectivement du socle et des oolithes ne s'individualisent pas du groupe, sauf dans le diagramme de stabilité du gypse pour l'échantillon de Lawey.

Dans les diagrammes de Korjinski, les eaux sont sursaturées vis à vis du quartz, sous-saturées vis à vis de la silice amorphe et se situent dans le domaine de stabilité de la kaolinite (fig. II-13).

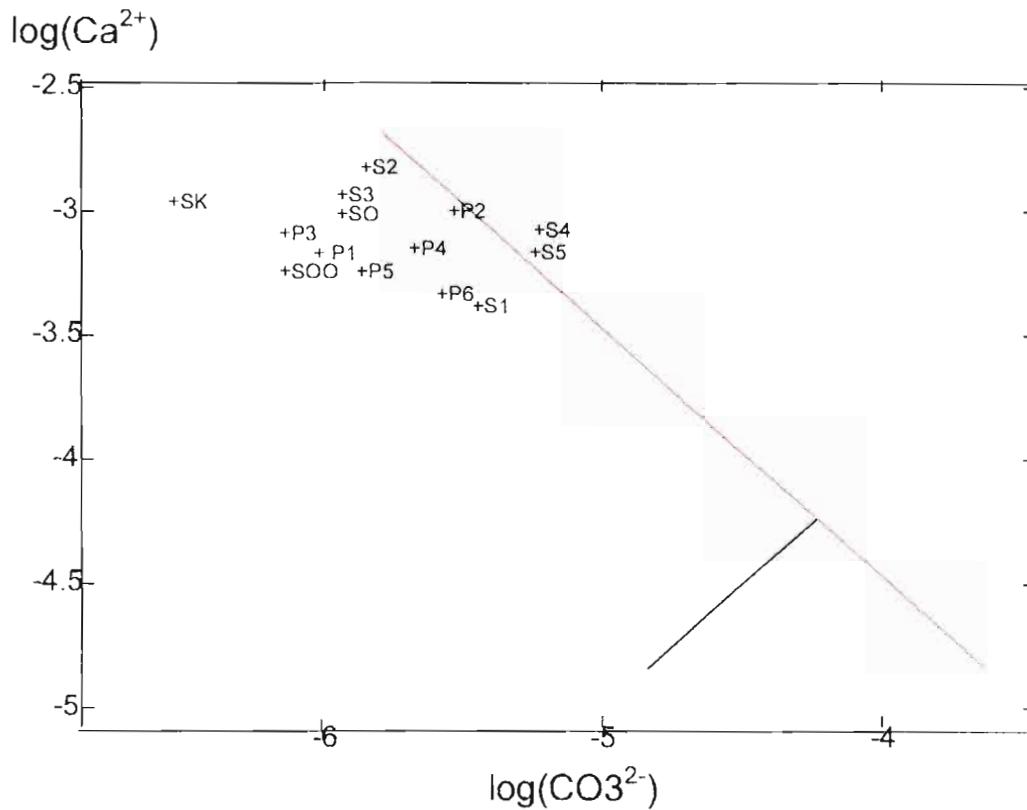


fig II-10 : Diagramme d'équilibre vis à vis de la calcite pour les eaux des nappes profondes

— Droite d'équilibre théorique

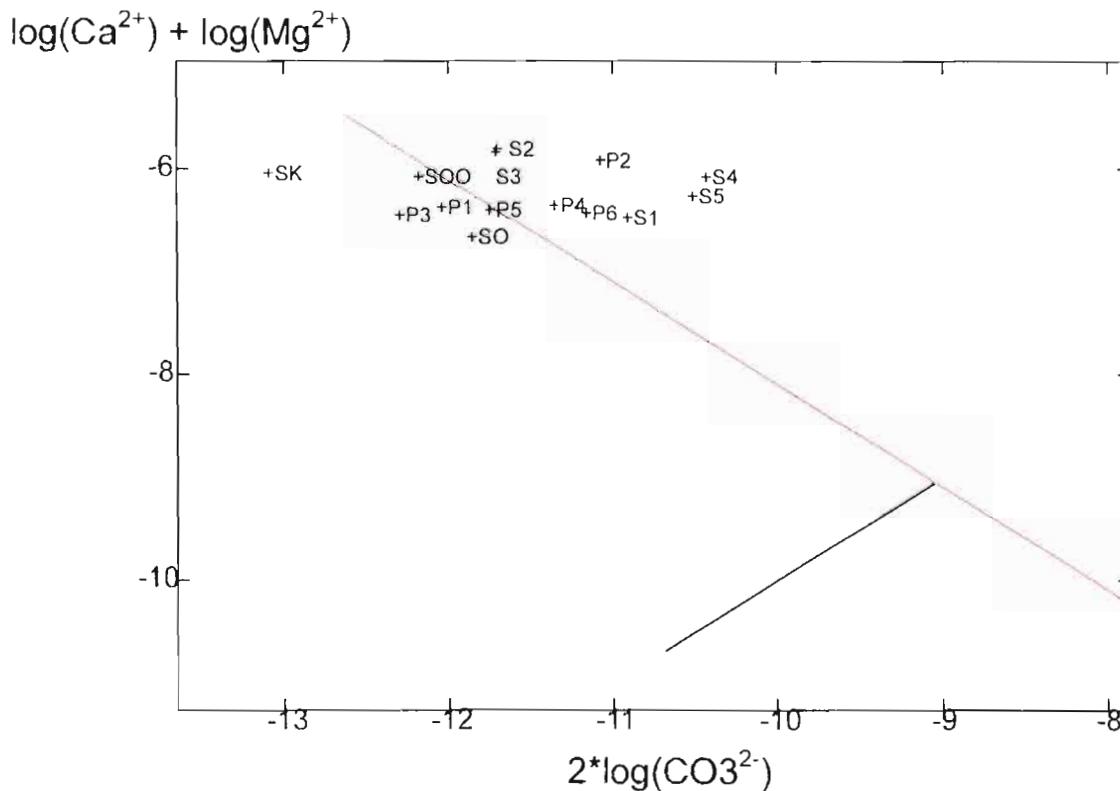


fig II-11 : Diagramme d'équilibre vis à vis de la dolomite pour les eaux des nappes profondes

— Droite d'équilibre théorique

$\log(\text{Ca}^{2+}) + \log(\text{H}_2\text{O})$

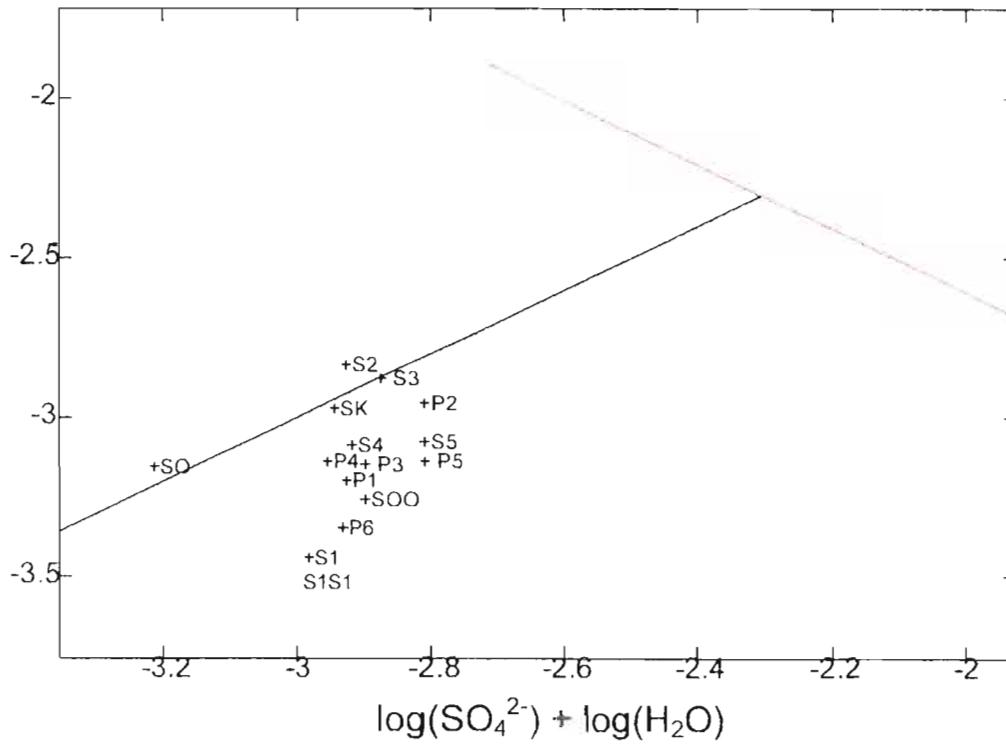


fig II-12 : Diagramme d'équilibre vis à vis du gypse pour les eaux des nappes profondes

— Droite d'équilibre théorique

$\log(\text{Mg}^{2+}) + 2 \cdot \text{pH}$

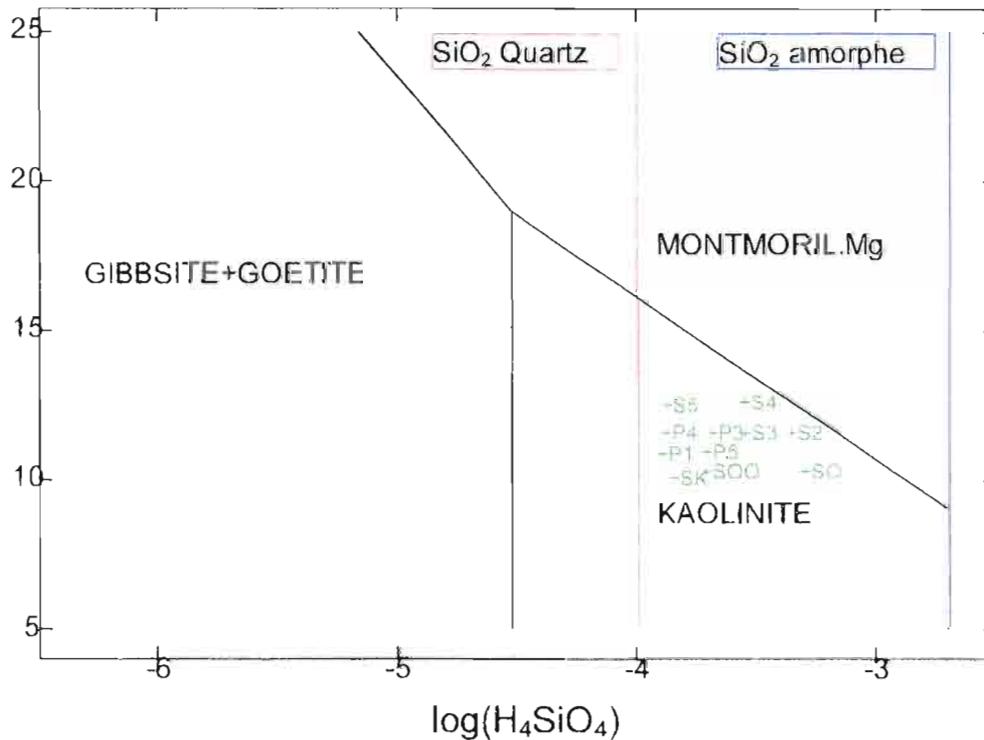


fig II-13 : Diagramme d'équilibre vis à vis des minéraux silicatés magnésiens pour les eaux des nappes profondes

### La nappe phréatique

Les eaux de la nappe phréatique forment un ensemble assez homogène dans les différents diagrammes de stabilité. Elles sont sous-saturées vis à vis de la calcite, de la dolomite, du gypse et la silice amorphe (fig. II-14, II-15, II-16 et II-17). Elles sont sursaturées vis à vis du quartz et se situent dans le domaine de stabilité de la kaolinite.

### Les eaux du groupe 3

Les échantillons de Gata Kouara Tegui (A3) et de Libo Atou Kouara (A5) et Libo Atou Baba (A4) sont saturés vis à vis de la calcite, légèrement sursaturés vis à vis de la dolomite et proches de la droite de saturation du gypse (fig II-14, II-15, et II-16).

L'échantillon de Diolé Goubé (A1) est sous-saturé vis à vis de la calcite et du gypse, et légèrement sursaturé vis à vis de la dolomite.

Le prélèvement de Moussa Diolo (A6) est sous-saturé vis à vis de ces trois minéraux.

Les eaux de Fada Tokobinkani Zarma (A2) sont saturées vis à vis de la calcite, sursaturées vis à vis de la dolomite, et sous-saturées vis à vis du gypse.

Dans le diagramme de Korjinski, on retrouve le même schéma que pour les eaux de la nappe phréatique : sursaturation vis à vis du quartz, sous-saturation vis à vis de la silice amorphe, et localisation des points dans le domaine de stabilité de la kaolinite (fig II-17).

**Conclusion :** Excepté pour la calcite, les états de saturation ne sont pas des paramètres très discriminants vis à vis de la nappe du CT3 et des aquifères profonds. En revanche, les eaux du groupe 3 se caractérisent bien par leurs indices de saturation. Toutefois, à l'exception des prélèvements de Gata Kouara Tegui et Libo Atou Kouara, il ne paraît pas possible de donner un comportement général de ces eaux. En d'autres termes, les états de saturation ne permettent pas de définir des caractéristiques intrinsèques à ce groupe.

## **II-3 CARACTERISATION ISOTOPIQUE**

### **II-3-1 Teneurs isotopiques**

#### Les nappes profondes

Dans la zone d'étude, les eaux des aquifères profonds se distinguent par des teneurs isotopiques assez négatives. Le spectre des teneurs en oxygène-18 semble toutefois plus étendu que celui des teneurs en deutérium (fig. II-18a). La distribution du deutérium ne montre pas de structure particulière tandis que celle de l'oxygène-18 montrerait un caractère faiblement bimodal (fig. II-18b). Il faut toutefois accorder à ces remarques une importance relative, car les diagrammes de fréquence ont été établis sur un faible nombre de points : 15 prélèvements pour l'oxygène-18 et seulement 13 pour le deutérium.

Les teneurs en  $^{18}\text{O}$  se caractérisent par une médiane de  $-7,18\text{‰}$ , un minimum de  $-7,83\text{‰}$  et un maximum de  $-6,55\text{‰}$ . Celles en deutérium présentent une valeur médiane de  $-54,1\text{‰}$  avec un minimum de  $-44,0\text{‰}$  et une teneur maximale de  $-59,3\text{‰}$ , ces valeurs étant référencées par rapport au SMOW.

Les teneurs médianes de l'aquifère des sables inférieurs restent proches de celles des nappes profondes :  $-7,26\text{‰}$  en oxygène-18. Mais la gamme des valeurs est moins étendue avec un

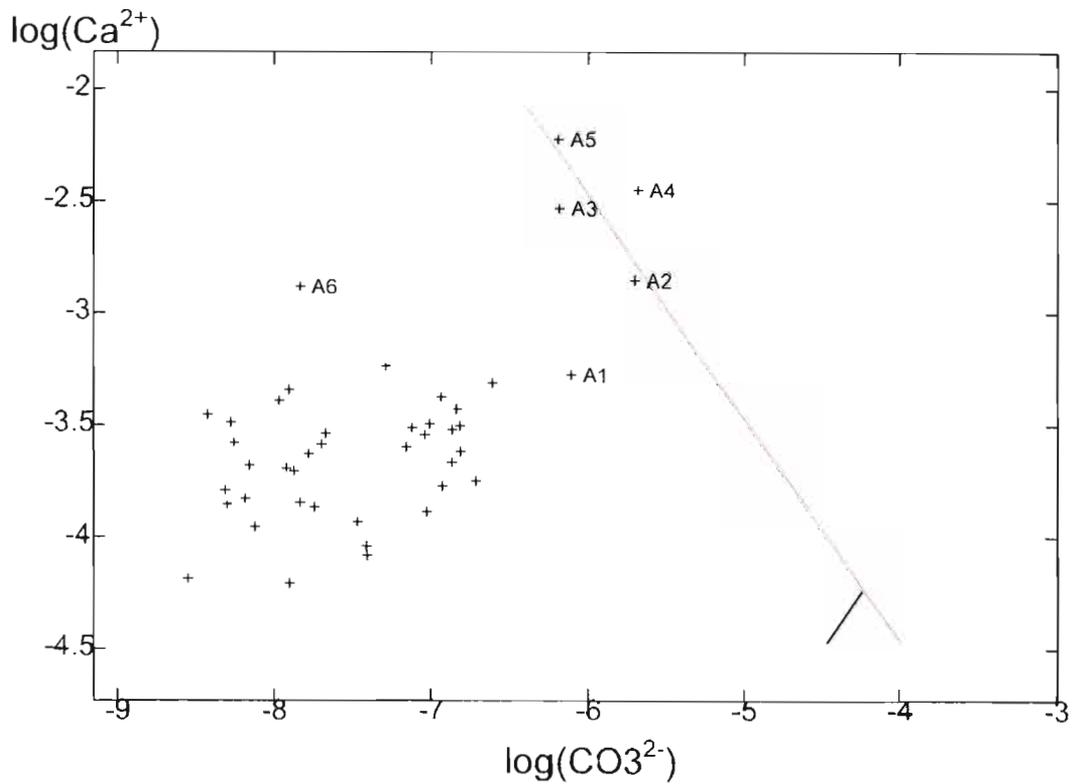


fig II-14 : Diagramme d'équilibre vis à vis de la calcite pour les eaux de la nappe phréatique et du groupe 3  
 ———— Droite d'équilibre théorique

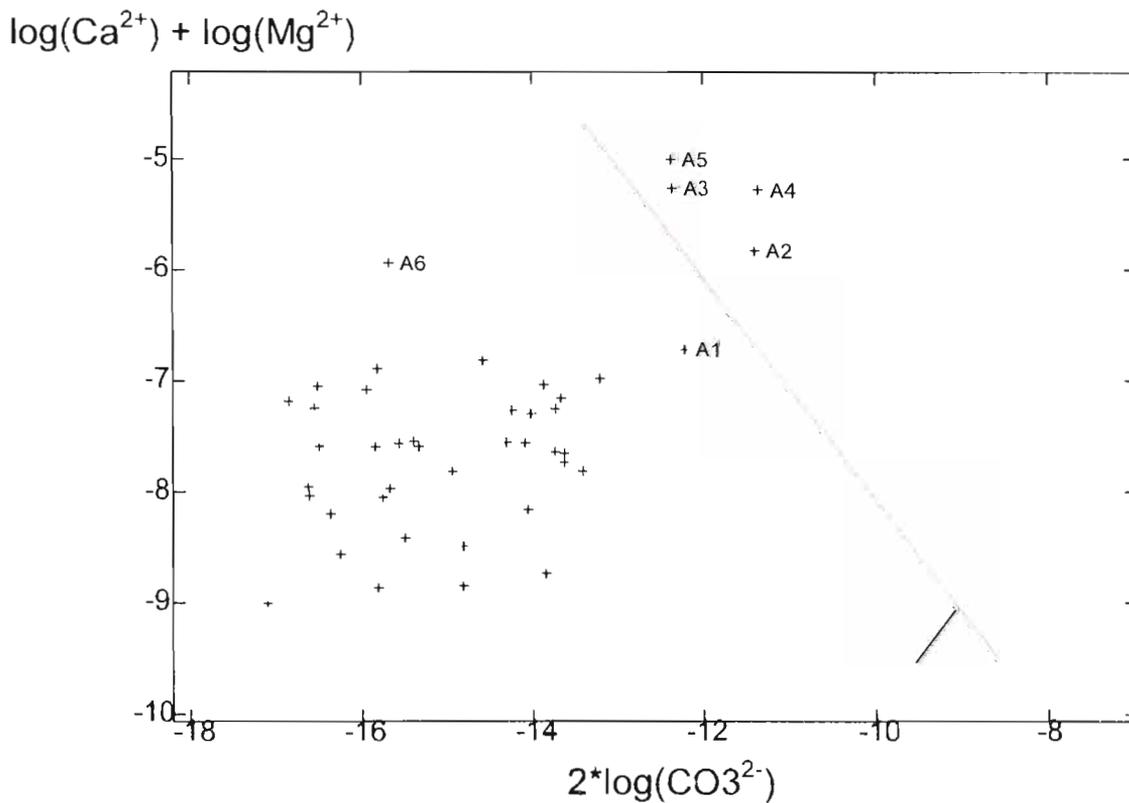


fig II-15 : Diagramme d'équilibre vis à vis de la dolomite pour les eaux de la nappe phréatique et du groupe 3  
 ———— Droite d'équilibre théorique

$\log(\text{Ca}^{2+}) + \log(\text{H}_2\text{O})$

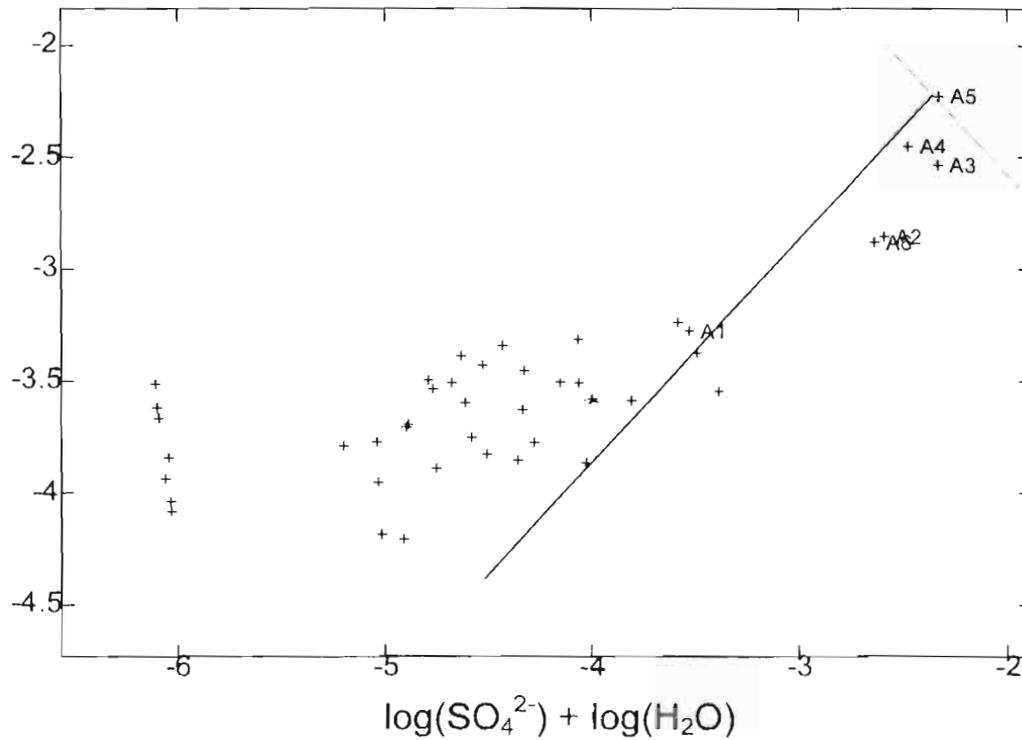


fig II-16 : Diagramme d'équilibre vis à vis du gypse pour les eaux de la nappe phréatique et du groupe 3

— Droite d'équilibre théorique

$\log(\text{Mg}^{2+}) + 2 \cdot \text{pH}$

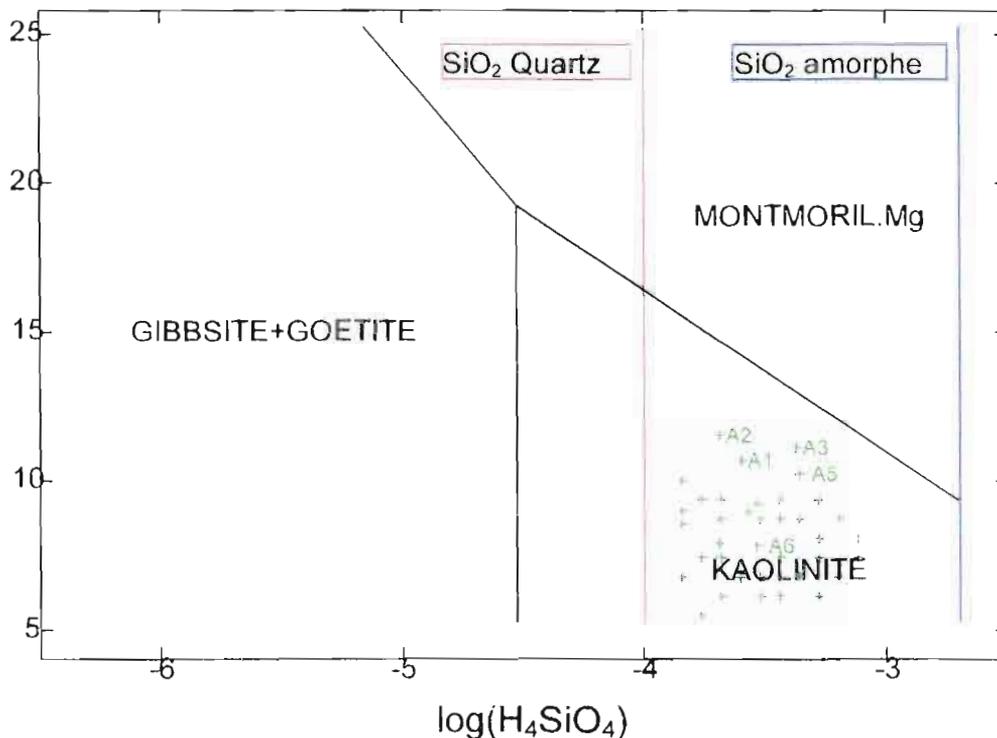


fig II-17 : Diagramme d'équilibre vis à vis des minéraux silicatés magnésiens pour les eaux de la nappe phréatique et du groupe 3

minimum de -7,70‰ et un maximum -6,83‰. La même remarque peut être faite au sujet des teneurs en deutérium. La médiane est située à -54,7‰ avec des valeurs extrêmes comprises entre -59,3‰ et -51,1‰. On retrouve à peu près les mêmes valeurs que celles fournies par Le Gal La Salle (1994) dans la zone située plus à l'est. Nos valeurs sont légèrement moins négatives et un peu plus dispersées. Mais cette différence n'est pas assez importante pour remettre en cause l'homogénéité isotopique de cet aquifère.

Les forages de Karey Bangou Lori Kouara (oolithes) et de Lawey (socle) se distinguent par des valeurs légèrement moins négatives par rapport à l'ensemble des aquifères profonds : respectivement -6,55‰ et -6,65‰ en  $^{18}\text{O}$  et -49,5‰ et -44,0‰ en  $^2\text{H}$ . Le prélèvement de Karey Bangou (référence MAR01) confère à l'ensemble des aquifères profonds la valeur maximale en oxygène-18 et l'échantillon de Lawey la teneur maximale en deutérium.

### La nappe phréatique

La nappe phréatique se distingue par des teneurs isotopiques nettement moins négatives et des gammes de variation beaucoup plus étendues, comparées aux aquifères profonds. La répartition dans les diagrammes de fréquence est mieux caractérisée. Le spectre des teneurs en oxygène-18 semble fournir une distribution à peu près normale avec un maximum aux environs de -3,75‰ (fig. II-19a). La distribution du deutérium est beaucoup moins régulière et semble se présenter de façon bimodale avec deux pics aux alentours de -27,0‰ et -19,0‰ (fig. II-19b).

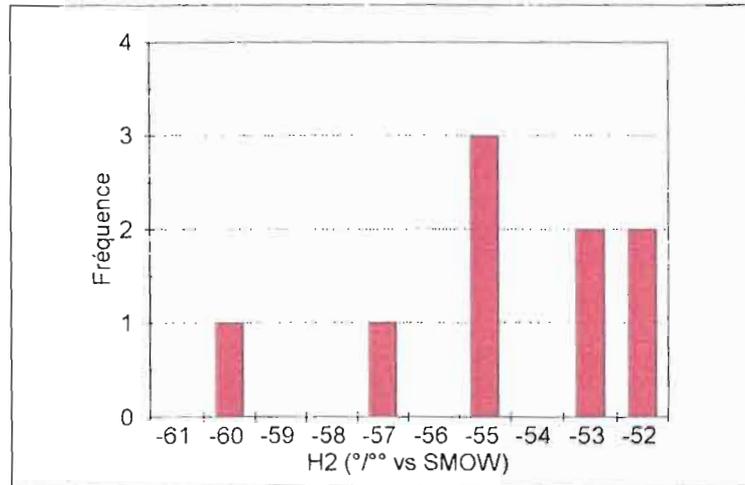
Les teneurs en oxygène-18 et deutérium varient entre -5,51‰ et -2,0‰ pour une valeur médiane de -3,62‰. Celles en deutérium s'étendent entre -30,7‰ et -17,7‰ et présentent une médiane de -22,7‰. Ces valeurs sont concordantes avec les trois prélèvements effectués sur la nappe du CT3 plus à l'est par Le Gal La Salle (1994).

La teneur médiane en oxygène-18 est proche de la moyenne des valeurs annuelles pondérées des précipitations sur la période de 1992 à 1995 à Niamey, -3,99‰, ce qui attesterait de la recharge actuelle de la nappe. Cependant la gamme des teneurs de la nappe est légèrement plus étendue que celle des moyennes annuelles sur la même période (Leduc et Taupin, 1997). Toutefois, elle rentre dans l'extension des teneurs données à l'échelle mensuelle ou de l'événement pluvieux (Taupin et al., 1997).

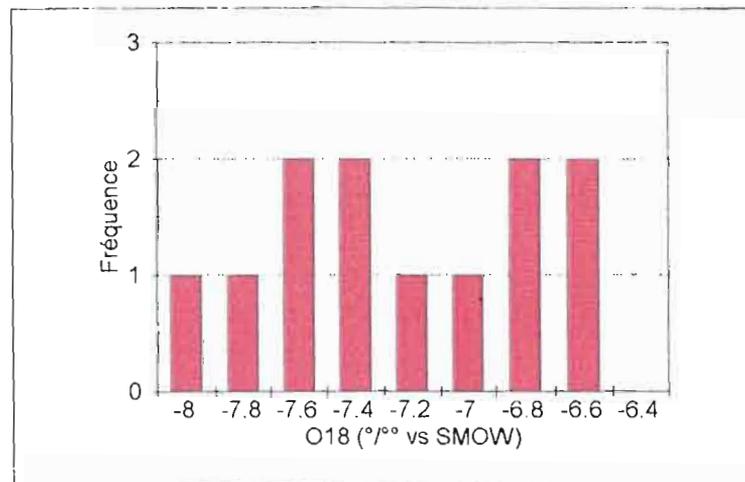
On peut tout de même observer que certains points offrent des valeurs légèrement plus positives que les valeurs mensuelles des mois les plus pluvieux, mois qui contribueraient de façon importante à la recharge de la nappe selon le principe des systèmes endoréiques aboutissant aux mares énoncé par Desconnets (1994). Cette remarque pourrait s'expliquer par deux phénomènes :

- soit par l'importance de la variabilité spatiale des teneurs des précipitations évoquée par Leduc et Taupin (1997). En effet nous comparons des valeurs étendues sur une zone de 2000 km<sup>2</sup> à des teneurs relevées sur des stations ponctuelles réparties sur la seule ville de Niamey.

- soit, plus exceptionnellement, par un léger enrichissement dû à l'évaporation lors du transport des eaux météoriques vers la mare et/ou lors de la stagnation des eaux dans la mare durant la courte période qui précède l'infiltration. Cette question mériterait d'être approfondies.

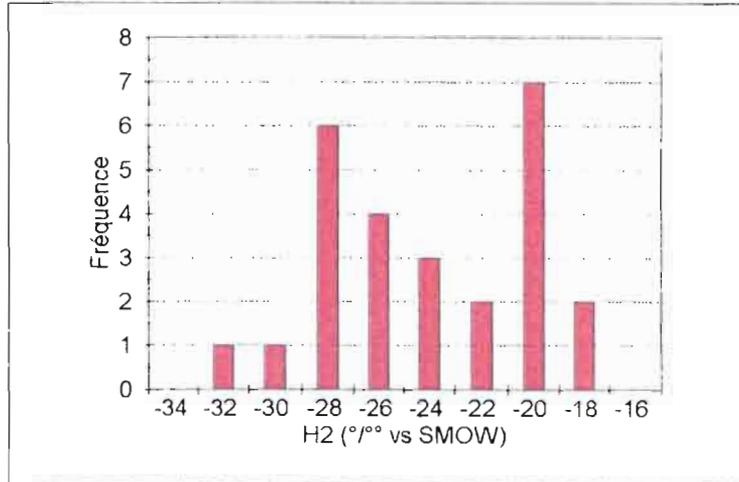


a : distribution du deutérium

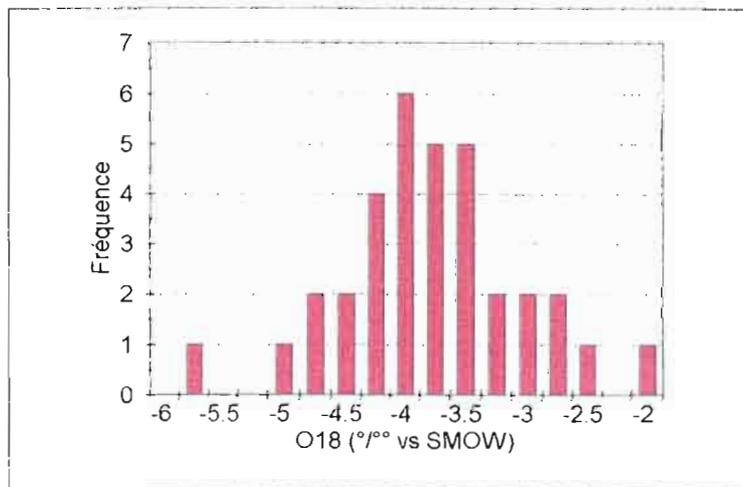


b : distribution de l'oxygène 18

fig II-18 : Diagramme de fréquence des teneurs isotopiques des aquifères profonds du Continental Terminal



a : distribution du deutérium



b : distribution de l'oxygène 18

fig II-19 : Diagramme de fréquence des teneurs isotopiques de la nappe phréatique

### Les eaux du groupe 3

A l'exception de Fada Tokobinkani Zarma 2, ces eaux ne se différencient pas du point de vue isotopique de celles de la nappe du CT3. Les prélèvements de Diolé Goubé Kouara et de Libo Atou Kouara présenteraient un faciès isotopique dans les gammes enrichies de la nappe phréatique (tab.4 en annexe 1).

Le prélèvement de Fada Tokobinkani Zarma 2 présente des teneurs isotopiques nettement plus négatives qui se rapprocheraient de celles des aquifères profonds : -6,41‰ en oxygène-18 et -45,9‰ en deutérium. On peut d'ors et déjà considérer ce point de façon particulière dans ce groupe. Ses teneurs laissent soupçonner un lien entre ces eaux et celles des aquifères profonds. Cette remarque seule ne suffit pas à expliquer le faciès chimique et la forte minéralisation de ces eaux puisque à Fada Tokobinkani Zarma, on observe des minéralisations deux fois plus élevées que celles des aquifères profonds. D'autres phénomènes seront évoqués par la suite.

## **II-3-2 Diagramme des éléments chimiques et isotopiques : relations entre les divers aquifères ?**

### **II-3-2-1 Relation $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$**

Le diagramme  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  confirme globalement les résultats de la classification hiérarchique ascendante. On observe distinctement deux groupes essentiellement composés par les échantillons de la nappe phréatique d'une part, et les prélèvements des aquifères profonds d'autre part (fig. II-20). Il est déjà possible de voir qu'aucune tendance ne permet de suspecter une relation entre les deux ensembles.

#### Les aquifères profonds

En plus des échantillons de notre zone, nous avons reporté dans le diagramme une partie des points issue de la thèse de Le Gal La Salle (1994) correspondant à l'aquifère des sables inférieurs (CT1) juste à l'ouest du Dallol Bosso et des points représentatifs de l'aquifère des oolithes (CT2) prélevés dans la partie sud-est du degré carré toujours à l'ouest du Dallol Bosso.

Les eaux se situent sous la Droite des eaux Météoriques Mondiales actuelles. Ces points se situeraient à proximité d'une droite définie pour les eaux anciennes (INC 1990 in Le Gal La Salle, 1994). Les teneurs isotopiques moins riches que celles des précipitations actuelles témoigneraient d'une recharge sous condition climatique différente, probablement plus humide et plus fraîche qu'à l'actuel (Fritz et Fontes, 1980).

Sur l'ensemble des échantillons des eaux profondes, il apparaît difficile de faire une distinction nette entre les différents aquifères. Globalement, on peut tout de même remarquer une légère tendance : les eaux de l'aquifère des oolithes semblent en général plus riches en isotopes lourds que celles du CT1.

Cependant, on observe aussi des sites comme Gounou Bangou et Samari Maisoso captant les sables inférieurs et présentant le même caractère légèrement enrichi. Ceci pourrait évoquer localement une relation entre les deux aquifères. Cette remarque doit être modérée. En effet, le forage de Samari Maisoso se situe dans une région où le niveau oolithique est absent. De toute

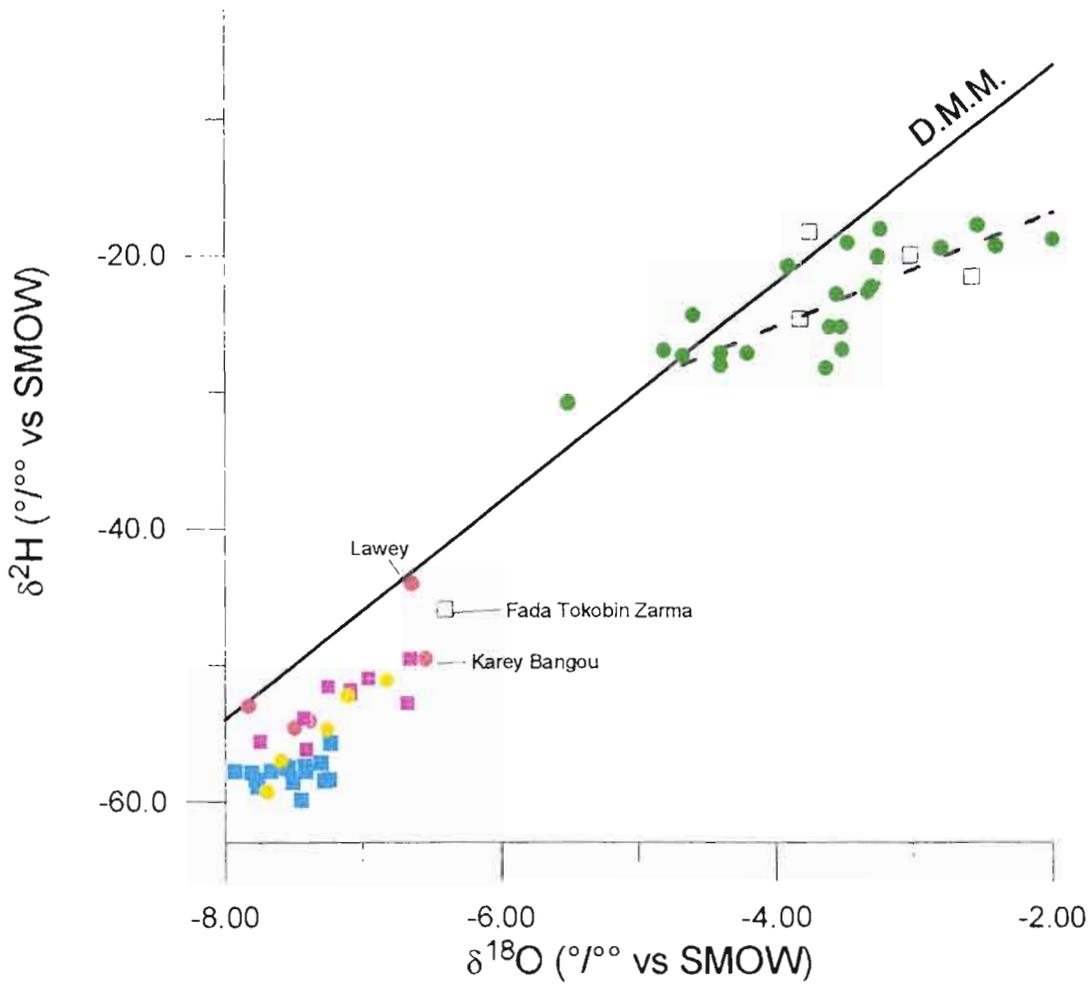
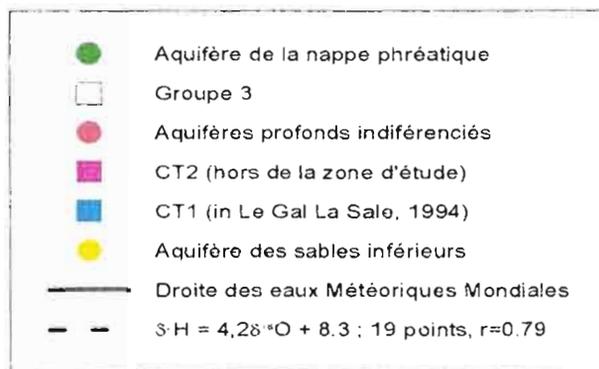


fig. II-20 : Diagramme  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$



évidence, il ne peut y avoir de relation entre les deux nappes sur ce site et, par la même occasion, ceci impose un doute supplémentaire sur cette hypothèse en ce qui concerne le village de Gounou Bangou.

Le puits-forage de Karey Bangou, seul ouvrage captant uniquement les oolithes dans notre zone et dont on ait les teneurs isotopiques, se situe dans la masse des points du CT profond. Il conserve le caractère légèrement plus enrichi énoncé au paragraphe précédent. Ceci serait contraire à l'idée souvent avancée que ce point serait un mélange entre un domaine profond et la nappe phréatique, mélange qui se ferait par une mauvaise étanchéité des parois du puits. Toutefois, on pourrait avancer un mélange en faible proportion. Dans ce cas, on pourrait supposer que le mélange n'affecte pas la représentativité de ce puits vis à vis de l'aquifère des oolithes.

Le point de Lawey se distingue légèrement du reste du groupe du CT profond et se rapproche plus de la Droite Météorique Mondiale.

### La nappe phréatique

Les eaux de la nappe phréatique se situent sous la Droite Météorique Mondiale. Ce phénomène est une spécificité des nappes superficielles de la bande soudano-sahélienne. Il serait dû à un enrichissement par évaporation non pas dans la zone non saturée (Joseph et al., 1992) mais à une évaporation lors de la chute des gouttelettes de pluie dans une atmosphère à faible hygrométrie (Taupin et al., 1997).

Certains points se situent au-dessus de la Droite Météorique Mondiale, mais cette position semble s'expliquer par l'erreur de mesure.

Le nuage de points aurait tendance à s'orienter obliquement. Cette inclinaison pourrait s'expliquer par une reprise évaporatoire des eaux. Cette tendance se caractérise par une droite de régression de pente 4,2. Cette pente rentre dans la gamme de variation des droites d'évaporation observée pour les eaux de surface (Fontes, 1976). Ceci serait un argument supplémentaire pour confirmer une reprise évaporatoire lors du transit des eaux de pluies et/ou de leur stockage dans la mare juste avant l'infiltration évoquée au III-3-1.

En revanche, cette valeur de 4,2 ne rentrerait pas dans les étendues des pentes données par Alison et Barnes (1983) dans les expériences de laboratoire menées sur l'évolution isotopique d'une eau dans un sol non saturé. Entre outre, Taupin (1990), dans son étude sur l'évaluation isotopique de l'évaporation en zone non saturée sous climat sahélien, a fourni des pentes d'évaporation comprises entre 2,0 et 2,2. Au vu de ces résultats, l'hypothèse d'une évaporation dans la zone non saturée ne serait pas privilégiée.

### Les eaux du groupe 3

En ce qui concerne ces eaux, le diagramme confirme ce qui avait été remarqué au paragraphe II-3-1, c'est à dire qu'à l'exception du point de Fada Tokobinkani Zarma, les échantillons de ce groupe ne se différencient pas isotopiquement des eaux de la nappe du CT3.

Les prélèvements de Diolé Goubé Kouara et de Libo Atou Kouara sembleraient s'inscrire dans la tendance évaporatoire énoncée au paragraphe précédent.

On observe à nouveau la singularité du point de Fada Tokobinkani Zarma 2 par rapport au reste du groupe. Graphiquement, il se rapproche nettement plus du groupe du CT profond que

de l'ensemble formé par les eaux de la nappe phréatique. Ceci confirme qu'il existe en ce point une relation avec les aquifères profonds. Il s'en individualise toutefois légèrement, ce qui renforce l'idée d'un phénomène supplémentaire à la contamination depuis une nappe profonde.

**Conclusion** : Dans la zone d'étude, les teneurs isotopiques semblent être un bon critère de différenciation entre les eaux superficielles et les eaux des aquifères profonds. Cependant, la distinction entre les nappes profondes resterait plus difficile. Le diagramme  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  ne montre pas de relation entre les aquifères profonds et la nappe phréatique.

### II-3-2-2 Diagramme $\text{Cl}^-$ vs $\delta^{18}\text{O}$

Les différents diagrammes croisant les paramètres chimiques entre eux, où avec les données isotopiques, ont pratiquement tous aboutis aux mêmes résultats. Le diagramme  $\text{Cl}^-$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  est représentatif du comportement des échantillons dans de tels graphiques.

Comme dans le cas précédent, on observe distinctement deux groupes correspondant à l'aquifère du CT3 et aux nappes profondes (fig. II-21).

Dans le groupe des eaux profondes, la plupart des échantillons se regroupent autour d'un ensemble formé essentiellement des sables inférieurs et de deux prélèvements classés dans les aquifères profonds indifférenciés. Les eaux des sables inférieurs de notre zone ont la même signature isotopique que celles prélevées par Le Gal La Salle (1994). Toutefois, elles seraient légèrement plus enrichies en chlorure. Cette remarque n'est pas généralisable à tous les ions majeurs.

Les deux échantillons classés dans les prélèvements à aquifères profonds indifférenciés, et appartenant au nuage de points correspondant au CT1, sont Labou Titiloua F2 et Sisan Maourey. Le forage de Labou Titiloua F2 capte les nappes du socle et des oolithes. L'aquifère capté par le forage de Sisan Maourey est inconnu. Sa position sur le diagramme pourrait le classer dans les sables inférieurs.

Trois échantillons se détachent de ce groupe : Lawey, Samari Kaïna et Karey Bangou Lory Kouara. Ce dernier semble toutefois plus proche de la masse des aquifères profonds. Il ne s'individualise que par une teneur isotopique légèrement supérieure. Ceci pourrait soit traduire le mélange en faible proportion déjà évoqué (cf. II-3-2-1) soit caractériser le pôle de l'aquifère des oolithes. Le point de Lawey pourrait s'expliquer par une particularité du socle. Il se distingue par une concentration en chlorure dans l'étendue de celle de la nappe phréatique. Ce point n'a pas pour autant une minéralisation similaire puisque sa conductivité est plus élevée que celles relevées dans la nappe phréatique. La nappe captée à Samari Kaïna n'étant pas identifiée, nous ne pouvons soutenir aucune hypothèse pour expliquer sa position.

Les eaux de la nappe phréatique forment un ensemble homogène. Les teneurs en chlorure ne rendent pas compte du caractère évaporé évoqué dans le diagramme  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$ .

Bien qu'ayant des teneurs isotopiques semblables à celles de la nappe du CT3, les eaux du groupe 3 se démarquent par des concentrations en chlorure plus élevées. Sur ce diagramme, l'échantillon de Gata Kouara Tegui se rapproche plus de l'ensemble de la nappe phréatique, mais si on répète un tel diagramme avec d'autres ions majeurs, il se distingue plus clairement du groupe des eaux du CT3.

L'échantillon de Fada Tokobinkani Zarma 2 apparaît de nouveau comme un cas particulier. Il est caractérisé par une teneur isotopique appauvrie proche de celle des nappes profondes

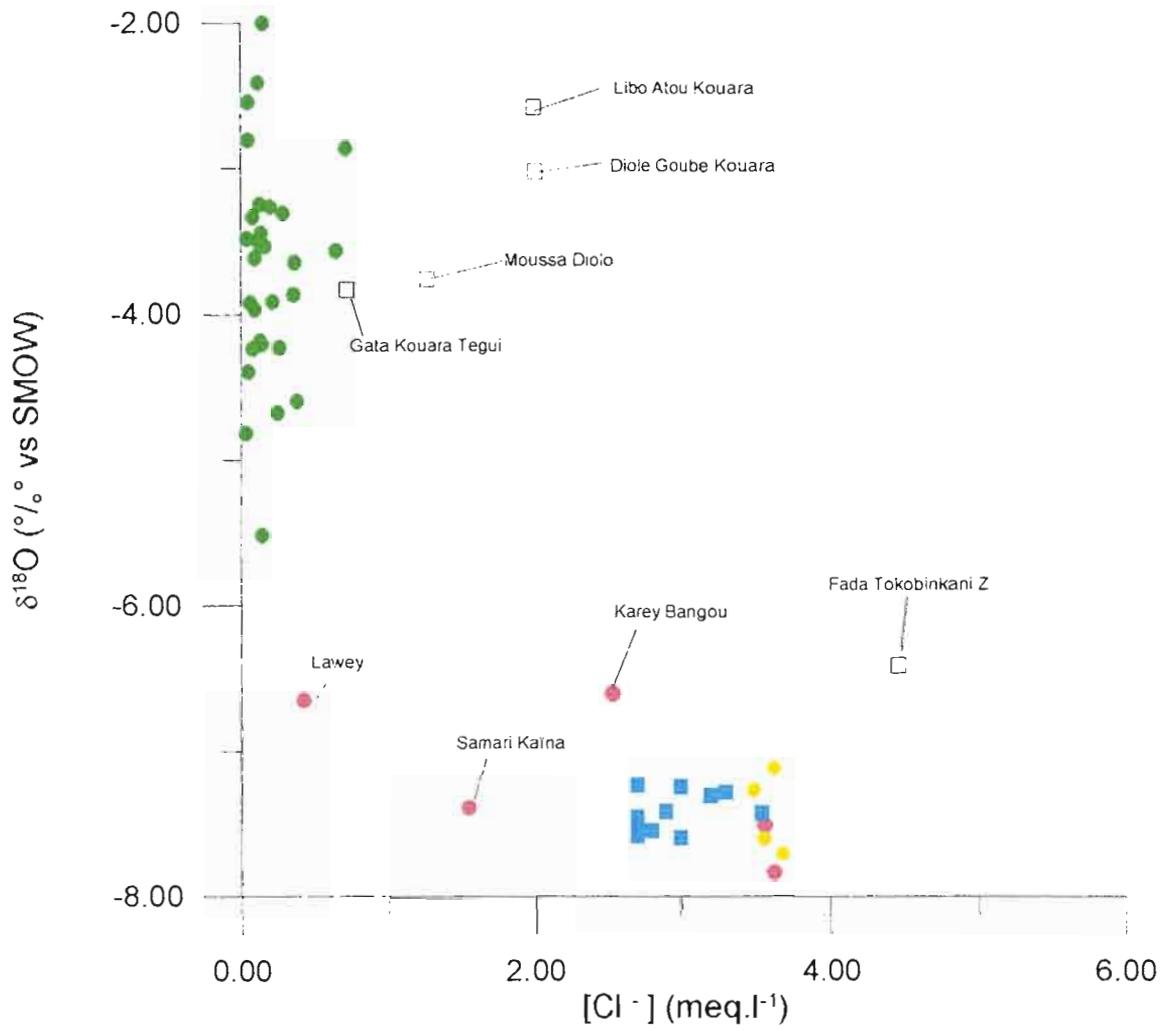
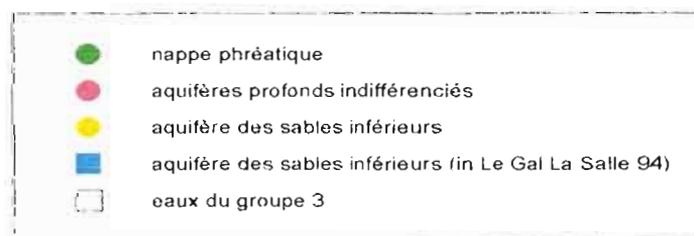


fig. II-21 : Evolution des teneurs en <sup>18</sup>O en fonction des concentrations en chlorure



mais se distingue bien du groupe, par des concentrations en chlorure plus élevées. Ceci renforce à nouveau l'idée d'une relation avec les nappes profondes au niveau de ce puits doublée d'un second phénomène faisant augmenter la minéralisation.

**Conclusion** : Comme dans la relation  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$ , les eaux de la nappe superficielle et celles des aquifères profonds sont nettement différenciées, et il n'existe pas de tendance nette suscitant une quelconque relation entre les différents aquifères. Une distinction entre les aquifères profonds semble difficile bien que certains forages comme Karey Bangou Lory Kouara ou Samari Kaïna semblent se démarquer.

A l'exception du point de Fada Tokobinkani Zarma, les eaux du groupe 3 confirment un caractère isotopique semblable aux eaux de la nappe phréatique, mais se caractérisent par des minéralisations élevées.

Les eaux du puits de Fada Tokobinkani Zarma 2 corroborent leurs origines profondes, se distinguant toutefois par une minéralisation nettement plus élevée que celles des aquifères profonds.

## **II-4 CONCLUSION**

Au terme de ce chapitre, on peut dire que dans l'ensemble, il est possible de faire une nette distinction entre les eaux de la nappe superficielle et celles des aquifères profonds.

Les eaux de la nappe du CT3 se caractérisent par de faibles minéralisations, un faciès variant entre un pôle bicarbonaté calcique et un pôle nitraté calcique à sodique, et des états sous-saturés vis à vis de la plupart des minéraux. Les teneurs isotopiques sont négatives et à peu près représentatives de celles des pluies actuelles.

Les eaux des aquifères profonds sont plus fortement minéralisées avec un faciès sulfaté et bicarbonaté calco-sodique à sodique. Elles sont saturées à légèrement sous-saturées vis à vis des minéraux carbonatés (calcite et dolomite), et sont sous-saturé vis à vis du gypse. Elles présentent des teneurs isotopiques nettement plus appauvries que l'aquifère du CT3.

A partir du seul prélèvement de Karey Bangou Lory Kouara, il n'est pas possible de caractériser l'aquifère des oolithes. Le peu d'informations disponibles sur des prélèvements faits sur d'autres zones montre que isotopiquement les oolithes et les sables inférieurs sont très proches. L'échantillon de Karey Bangou Lory Kouara tendrait à montrer qu'ils sont aussi voisins chimiquement, du moins dans notre zone d'étude. Cependant des mesures de conductivités faites sur d'autres sites ont montré que les oolithes pouvaient avoir des minéralisations un peu plus faibles que les sables inférieurs. En définitive, il faudrait faire une étude chimique plus approfondie de cet aquifère.

Le seul échantillon des eaux du socle, Lawey, montrerait un faciès isotopique identique à celui des aquifères profonds avec une minéralisation plus faible. Cependant, les eaux du socle pourraient avoir des caractéristiques très hétérogènes (cf. IV-2-3-2).

En l'état actuel des connaissances, il apparaît difficile de distinguer les aquifères profonds entre eux et donc de préciser d'éventuelles relations. Des études chimiques et isotopiques plus complètes seraient nécessaires.

Les eaux du groupe 3 ont des caractéristiques chimiques hétérogènes. Chaque échantillon semble se définir de façon particulière. Toutefois, à l'exception du point de Fada Tokobinkani Zarma, elles ont des teneurs isotopiques typiques de la nappe phréatique. Ce caractère laisse penser qu'elles sont en fait des eaux de la nappe du CT3 ayant subi une évolution particulière et non une contamination par les aquifères profonds plus minéralisés comme on aurait pu le croire. D'autres phénomènes pourraient être la cause de ces minéralisations particulières :

-pollution,

-nappes perchées à caractéristiques chimiques différentes,

-dissolution de minéraux contenus dans de fines lentilles évaporitiques de faible extension. Cette hypothèse expliquerait l'état saturé de ces eaux vis à vis de certains minéraux. Cette supposition est compatible avec le caractère lacustre et palustre de la sédimentation du Continental Terminal.

-évaporation, ce phénomène pourrait être évoqué sur certains puits, comme le puits de Gata Kouara Tegui, où le niveau piézométrique est proche de la surface (10 m). Des remontées d'eau par capillarité pourraient entretenir le phénomène. En effet au vu de l'étude géologique (cf. III-2-3), il n'est pas exclu que localement la nappe du CT3 soit contenue dans des roches à faible granulométrie (sils argileux) qui pourraient entraîner des remontées capillaires assez importantes.

Ces hypothèses ne sont données qu'à titre indicatif et ne s'appuient sur aucun argument quantitatif. Par exemple, il faudrait vérifier que les conductivités, les concentrations et les états de saturation soient compatibles avec des eaux à caractère évaporé. Des modèles d'évaporation des eaux croisant chimie et isotope seraient nécessaires pour vérifier une telle hypothèse.

Le prélèvement de Fada Tokobinkani Zarma 2 est le seul à présenter des teneurs isotopiques proches de celles des aquifères profonds. Son faciès serait sulfaté calcique et sa situation dans le diagramme de Piper serait proche de celle des aquifères profonds. Une relation avec les aquifères profonds est donc envisageable sur ce site. Cependant les très fortes conductivités (plus du double de celles observées dans les aquifères profonds) laissent supposer qu'un phénomène supplémentaire est responsable de l'évolution de ces eaux. Le phénomène d'évaporation peut être envisagé dans ce cas car le niveau piézométrique se situe à seulement 6 m de la surface.



***Chapitre III :***  
***Reconstitution de la***  
***géologie des aquifères***



Le but de ce chapitre est de définir la géologie détaillée des niveaux aquifères présents dans la zone d'étude, de vérifier leur continuité et de repérer d'éventuelles relations géométriques entre ces formations.

Les conclusions sur la reconstitution géologique des aquifères du Continental Terminal dans la région de Niamey (Monfort, 1996) ont fait ressortir deux faits importants sur la partie nord-ouest :

- De fortes perturbations affectent la stratigraphie de la région. Il existe des formations, lentilles locales de sables ou niveaux oolithiques, qui peuvent être confondues avec un des deux aquifères profonds. Ces confusions sont soutenues par d'importantes variations latérales de faciès et de nombreuses lacunes locales affectant l'ensemble des formations.

- Les formations du Continental Terminal ont tendance à s'amincir voire disparaître dans cette zone.

Afin de spécifier les relations qui caractérisent les aquifères dans cette région, il semble nécessaire de clarifier les connaissances géologiques en reprenant en détail l'étude globale faite sur l'ensemble du degré carré de Niamey. Ceci permettra notamment de vérifier l'unicité et la continuité de ces formations.

En outre, il apparaît essentiel de préciser le type de relations que pourrait induire l'amincissement des formations imperméables :

- pas de relation si les niveaux aquifères s'interrompent avant que la puissance des aquicludes soit suffisamment faible pour favoriser un échange,
- simple contact si les formations imperméables disparaissent avant les nappes,
- drainance en quantité importante si les conditions piézométriques et d'épaisseur des aquicludes sont favorables.

En réponse, une cartographie des formations hydrogéologiques et une discussion de ces résultats sont proposées dans ce chapitre. Le toit du socle sera également cartographié afin de repérer d'éventuelles discontinuités de la couverture causées par des failles affectant le substratum. De plus, dans les études antérieures faites à l'est du fleuve Niger, le socle s'est révélé être un bon réservoir de type fracturé (Dehays, 1986). Il apparaît donc intéressant de regarder les relations entre ce réservoir et les aquifères sus-jacents.

En outre, notons que dans la majorité des cas les courbes isopaques sont difficiles à établir car l'épaisseur des formations peut varier brutalement entre deux points. Pour avoir une idée de l'évolution de la puissance des différentes formations, des cartes contenant les valeurs ponctuelles des épaisseurs seront fournies.

## **III-1 DONNEES DISPONIBLES ET INCERTITUDES**

### **III-1-1 Données disponibles**

Ce travail est principalement basé sur des coupes de forages programmés lors de grandes campagnes d'équipement pour l'hydraulique villageoise dont le but est l'alimentation en eau potable des populations rurales. Ces programmes sont :

- Entente Phase 2 : réalisé de janvier 87 à avril 88, 16 forages utilisés,
- BID : réalisé de février à avril 86, 2 forages utilisés,
- Nord Niamey : réalisé de mars à novembre 83, 2 forages utilisés,

-plus quelques autres isolés (réalisés au cours des années 90), soit au total 22 forages.

Ces forages ont été réalisés par des sociétés privées. Les coupes ont été rassemblées et mises au propre par le BRGM.

L'altitude des têtes de forages est généralement estimée sur carte. Toutefois, sur 3 points l'altitude exacte a été établie par nivellement.

### **III-1-2 Incertitude sur les résultats**

Les incertitudes pesant sur ce travail sont essentiellement dues à la validité des informations contenues dans les documents utilisés. Ainsi, nous avons pu dégager 2 types d'incertitudes : une sur l'estimation des altitudes, l'autre sur la distinction des formations.

Sans toutefois s'étendre sur la question, on peut dire aussi qu'un des facteurs limitants de cette partie est la répartition hétérogène des points qui sont plutôt concentrés dans la partie est. Ceci restreint les interpolations dans la partie ouest (fig. III-1).

#### **III-1-2-1 Incertitude sur les altitudes**

##### Origines des erreurs

L'incertitude sur les altitudes des toits et des murs des formations est essentiellement due à l'estimation des altitudes topographiques sur carte. De manière moins importante, elle peut être induite par certaines négligences du foreur.

L'erreur sur l'estimation des altitudes des formations est due à la démarche utilisée. Les coupes nous fournissent la cote relative, que nous retraduisons en cote absolue moyennant la connaissance de l'altitude de la surface du sol établie pour la plupart des points sur carte. Or, ces cartes souffrent de fortes imprécisions. Ces imprécisions sont de 2 types : tracé des courbes de niveaux des cartes topographiques parfois douteux et erreurs sur la position des forages.

En effet, l'altitude de la plupart des têtes de forages a été estimée d'après des cartes au 50 000<sup>e</sup>. Or la comparaison de ces altitudes avec celles établies par nivellement à propos des puits montre parfois des décalages importants. Dans le cas extrême du puits de Dey Tegui une différence d'environ 10 m a été relevée.

A ces imprécisions viennent s'ajouter les erreurs sur la position des forages. Ces erreurs sont directement liées à la manière dont les coordonnées ont été établies. En effet, les coordonnées des forages dans les dossiers BRGM n'ont jamais été mesurées sur le terrain mais évaluées d'après des cartes au 200 000<sup>e</sup>. Les coordonnées sont données à une demi minute près. Ceci est très approximatif et peut induire des erreurs supplémentaires sur l'estimation des altitudes.

Par exemple, pour les villages construits sur une forte pente ou en bordure de falaise, un décalage horizontal de quelques mètres peut engendrer des variations d'altitude importantes. Pour le forage de Sefo l'erreur d'une demi minute engendre une incertitude de 10 m sur l'estimation de l'altitude.

En outre des négligences dans le rapport du foreur peuvent engendrer des erreurs sur l'estimation de la profondeur. En effet, ce dernier estime la profondeur des formations en

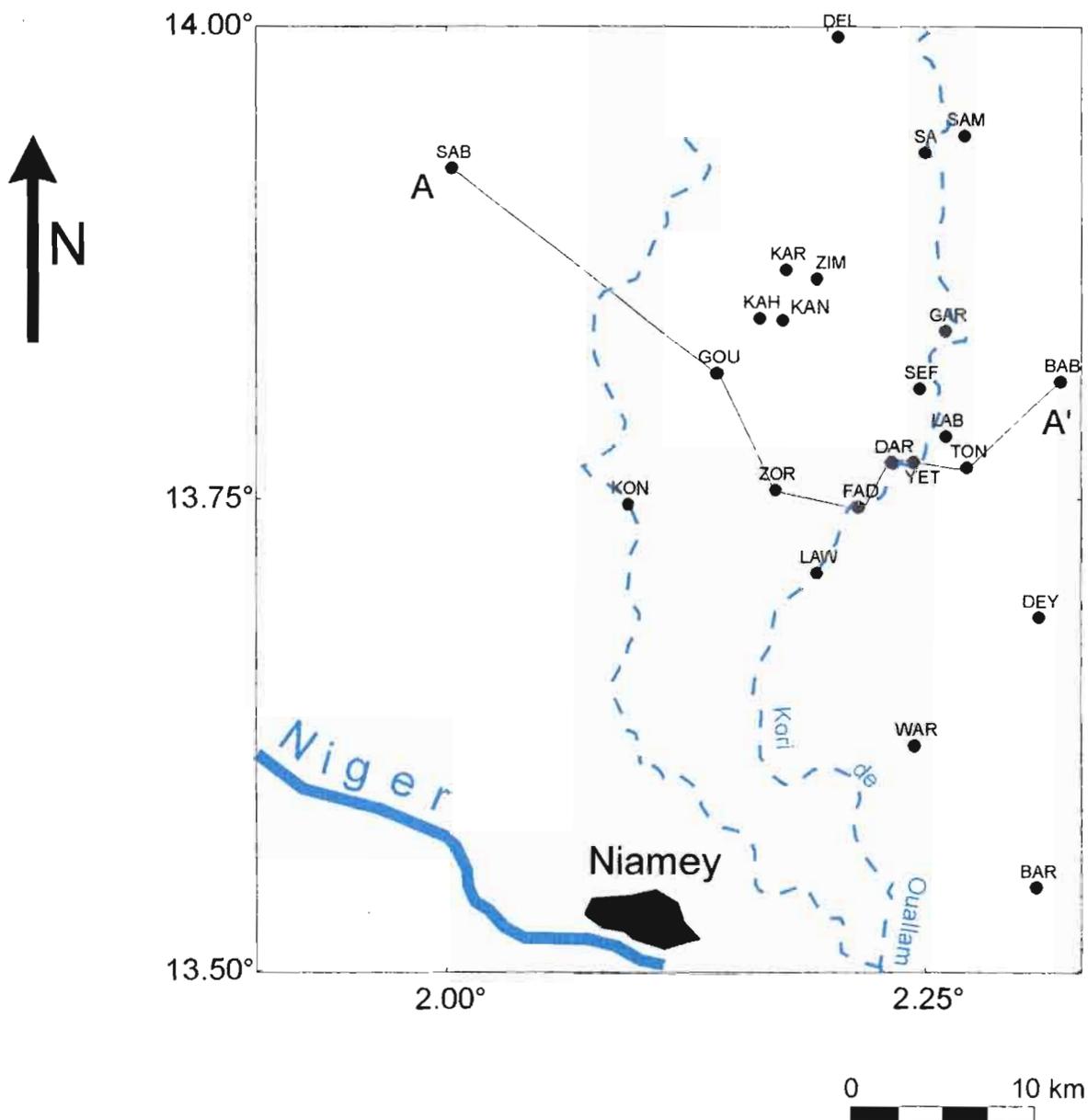


fig. III-1: Localisation des forages

- |                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| BAB : Baba Kaïna             | LAW : Lawey          |
| BAR : Barkiawel Beri         | SAB : Sabon Gari     |
| DAR : Dare Gourou            | SA : Samari          |
| DEL : Deli Tondi Atou Kouara | SAM : Samari Maïsozo |
| DEY : Dey Teguy              | SEF : Sefo           |
| FAD : Fada Tokobinkani Zarma | TON : Tondi Gamey    |
| GAR : Gardama Kouara         | WAR : Wari           |
| GOU : Gounou Bangou          | YET : Yete Kouara    |
| KAH : Kahlen Gourou          | ZIM : Zimba          |
| KAR : Karey Bangou           | ZOR : Zori Bangou    |
| KON : Kone Beri              | KAN : Kantchi Bangou |
| LAB : Labou Titiloua         |                      |

comptant le nombre de barres de forage qu'il introduit dans la tige de foration. Or il arrive que par inattention le foreur oublie de compter une barre, ce qui décale l'estimation de la profondeur des formations.

### Corrections

Nous avons donc cherché le moyen de réduire ces erreurs. Pour ce, nous avons procédé de la façon suivante par itération :

- A chaque formation cartée, on observe une évolution générale.
- On repère les points en discordance avec cette tendance générale ou simplement avec les points voisins.
- Ensuite, pour être certain que la différence d'altitude n'est pas due à une discontinuité, on compare la description de la formation du point concerné et celles des points voisins dans le but de relever des différences ou des nuances significatives.
- Si ce n'est pas le cas, on modifie les altitudes dans la mesure où l'interprétation de la carte nous le permet ou quand cela est possible, de façon à rendre l'altitude cohérente avec un point voisin nivelé.

Tout ceci nous a permis de relever les erreurs les plus importantes et de ramener l'incertitude à environ 5 m.

### **III-1-2-2 Distinction des formations**

L'autre difficulté est de reconnaître et de suivre les formations à travers les descriptions des coupes. En effet, il faut avoir à l'esprit plusieurs faits avant d'interpréter ces coupes.

Les descriptions n'ont pas été faites par la même personne. Une même roche peut être décrite différemment dans ses nuances. Ainsi, à Kone Béri, deux forages faits à quelques mètres l'un de l'autre lors de programmes différents (CEAO et BID) décrivent deux formations comprises entre 10 et 28 m de profondeur de la façon suivante :

- sables argileux jaune brun et argile compacte sableuse jaune,*
- pélites jaunâtres et faciès argileux pélitique jaune.*

A ceci vient s'ajouter le manque de qualification des descripteurs qui sont souvent des foreurs sans aucune formation en géologie. En outre, aucune étude granulométrique et minéralogique sérieuse n'est venue appuyer les descriptions des coupes de forage.

La seule façon de supprimer ce type d'incertitude est de comparer les forages concernés avec les forages les plus proches et d'essayer d'y retrouver des analogies.

## **III-2 ETUDE DES DIFFERENTS AQUIFERES**

La première lecture des coupes a laissé paraître 4 types de réservoir dans la zone d'étude, de la surface vers la profondeur :

- les 3 aquifères du Continental Terminal, la nappe phréatique, les oolithes ferrugineuses et les sables inférieurs
- le socle sur lequel repose l'ensemble de ces séries.

## **III-2-1 Le socle**

### **III-2-1-1 Difficultés rencontrées**

La cartographie de la profondeur du socle est peu aisée. D'après les descriptions il est difficile de faire la différence entre un socle sain, un socle peu altéré et un socle altéré à l'extrême jusqu'à sa kaolinisation (cette altération relevant de la période où les bordures du bassin sédimentaire n'étaient pas encore recouvertes, (cf. I-2-2-2)). En définitive, on ne sait si ce qui est décrit comme socle est du socle sain ou des altérites argileuses. Cette difficulté est de premier ordre car la première description laisse penser que le socle, s'il est suffisamment fracturé, est aquifère alors que la dernière description suppose l'imperméabilité du moins sur la zone correspondant à la couche d'altération.

En outre, il existe peu de forages ayant atteint le socle sain, 9 forages seulement concentrés surtout dans la partie centre-ouest. En revanche nous avons un peu plus d'information sur le sommet des altérites, 14 forages l'ayant atteint.

Pour avoir une idée plus précise de la continuité du socle, une cartographie des deux types de formations sera donnée.

### **III-2-1-2 Le socle sain**

La bathymétrie est caractérisée par des variations locales importantes (fig. III-2). Ce fait conjugué à la faible densité de points où la formation a été atteinte rend difficile le tracé des isobathes. Une carte avec la localisation des points et l'altitude du sommet de la formation sera simplement fournie.

Cette cartographie accidentée est en fait attribuée à la variabilité de l'épaisseur de la couche d'altérite. Lors de l'altération, l'épaisseur de terrain atteinte par le processus de dégradation varie en fonction de la densité de fracturation. Deux points voisins peuvent donc ainsi avoir le socle sain à des profondeurs variables. Globalement, il est toutefois possible d'observer une augmentation de l'altitude du socle sain en allant vers l'ouest.

### **III-2-1-3 Le socle altéré**

Sous ce terme, nous avons regroupé les premières formations susceptibles de ne plus appartenir au Continental Terminal mais à son substratum. Ces formations sont les suivantes : altérite, arène argileuse, kaolinite ou argile kaolinique (Greigert (1966) puis Machens (1973) ont décrit la transition entre le socle sain et le Continental Terminal par des altérites formées en grande partie de kaolinite), socle et socle altéré.

L'ensemble de la formation semble avoir un pendage régulier ouest-est (fig. III-3). Cependant, une rupture de pente est observée sur une ligne définie par les villages de Karey Bangou, Zimba, Sefo, Labou Titiloua et Tondi Gamey. Cette rupture peut être expliquée par :

- une flexure du substratum,
- la présence d'une faille affectant le socle,
- l'érosion totale ou partielle de la couverture altéritique.

L'hypothèse de la présence d'une faille est soutenue par des arguments tectoniques. La direction proposée est identique à celles des failles dites de Téguidat à l'ouest de l'Aïr

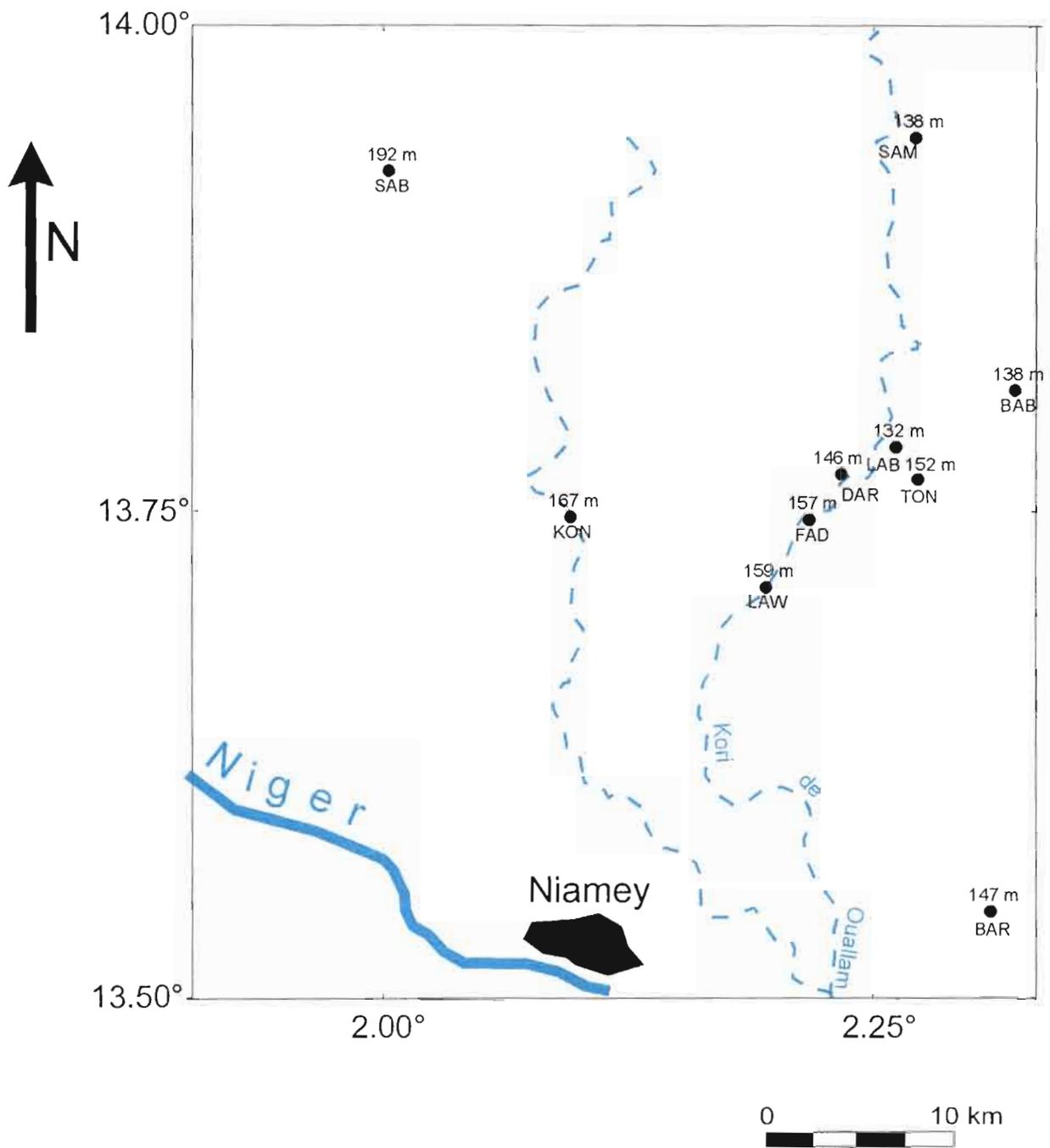


fig.III-2 : Carte indiquant les altitudes du socle non altéré

Altitude (m)  
 ●  
 Village

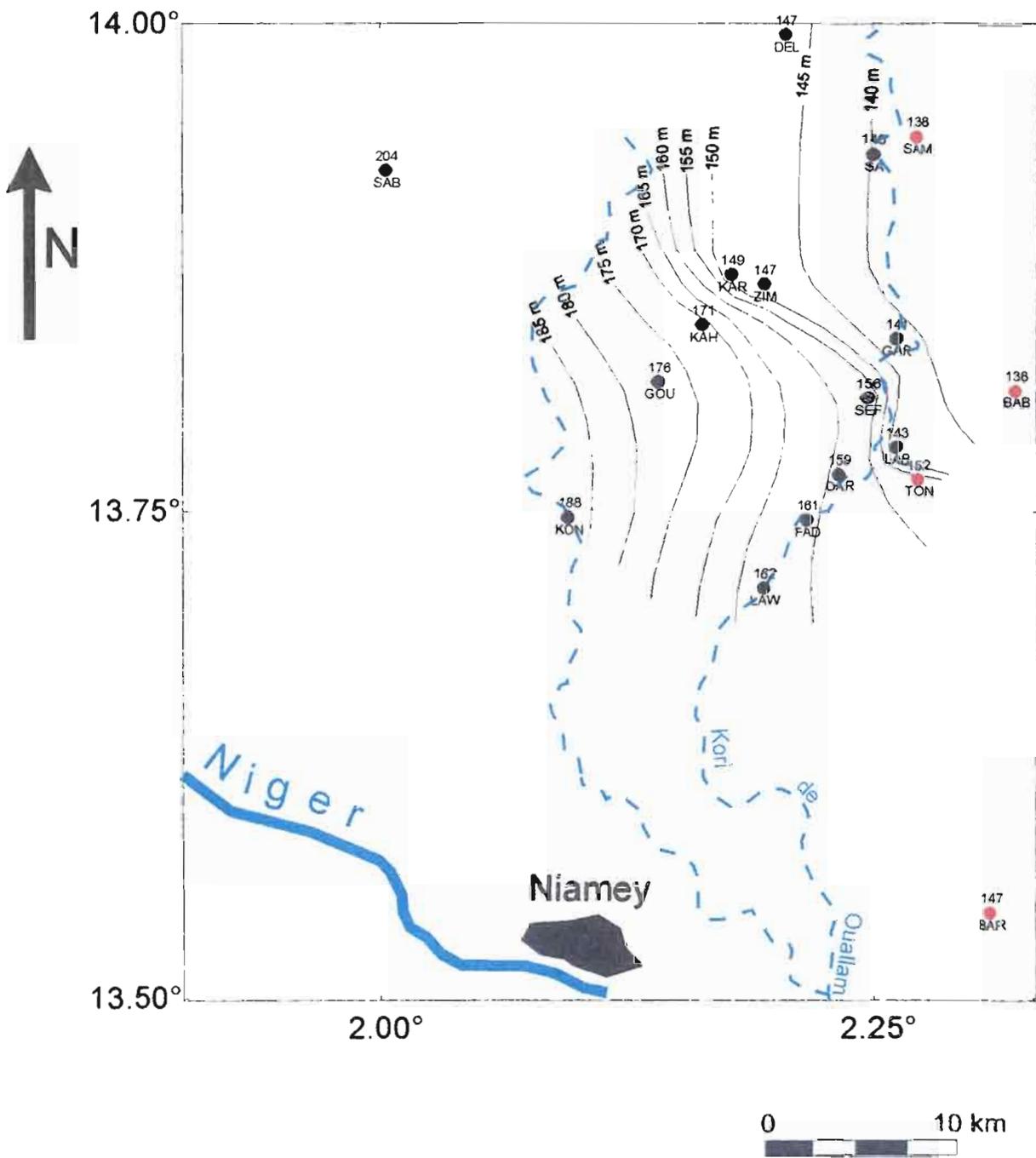


fig.III-3 : Carte des isobathes du socle altéré

Altitude (m)



Village

● socle sans altérites

(cf. I-2-1-2) et à celle de l'importante mais hypothétique faille qui affecterait le socle sous le Continental Terminal à l'ouest du Dallol Bosso (fig. I-6). Elle appartiendrait donc à la même tectonique qui aurait engendré la subsidence synsédimentaire au dépôt du Continental Terminal.

L'hypothèse de l'érosion de la couverture altéritique est défendue par le fait qu'à l'est de la rupture de pente, il existe 4 forages où la couverture altéritique est absente (fig III-4).

## **III-2-2 Les sables inférieurs**

### **III-2-2-1 Continuité**

Les types de formation pouvant être cartés comme aquifère des sables inférieurs dans notre zone sont :

- type S1 : sables moyens à grossiers qui correspondent à la description courante de la formation des sables inférieurs sur le degré carré,
- type S2 : sables fins,
- type S3 : silts argileux

La répartition des types S2 et S3 semble disparate dans l'espace (fig. III-5). De plus l'altitude du sommet de ces formations ne semble pas aberrante par rapport à celles observées sur les forages voisins qui ont des descriptions de type S1. On peut donc conclure que les trois types de sables appartiennent à la même formation.

Le pendage du sommet de la formation reflète celui du socle altéré. On retrouve la même rupture de pente observée sur la carte du sommet des altérites. Les solutions envisagées pour expliquer la rupture de pente sur le socle (III-2-1-2) peuvent se répercuter de diverses manières sur cette formation :

#### Flexure ou érosion de la couverture altéritique

Ces deux cas occasionneraient une simple flexure sur les formations sus-jacentes qui se déposeraient sur le paléo-relief. Les sables resteraient alors continus.

#### Faille affectant le socle

Si la faille est post-sédimentaire, la formation des sables a été affectée par la tectonique et de ce fait pourrait montrer une discontinuité.

Si la faille est synsédimentaire, elle peut avoir deux effets sur les séries du Continental Terminal. La faille pourrait soit se prolonger dans les sédiments supérieurs et créer une rupture dans ces séries, soit occasionner une simple flexure dans la couverture sédimentaire.

Dans l'état actuel des connaissances, il nous est impossible de trancher entre ces différentes hypothèses. Par la suite, nous considérerons donc le cas le plus simple qui confère à la formation des sables inférieurs un caractère continu.

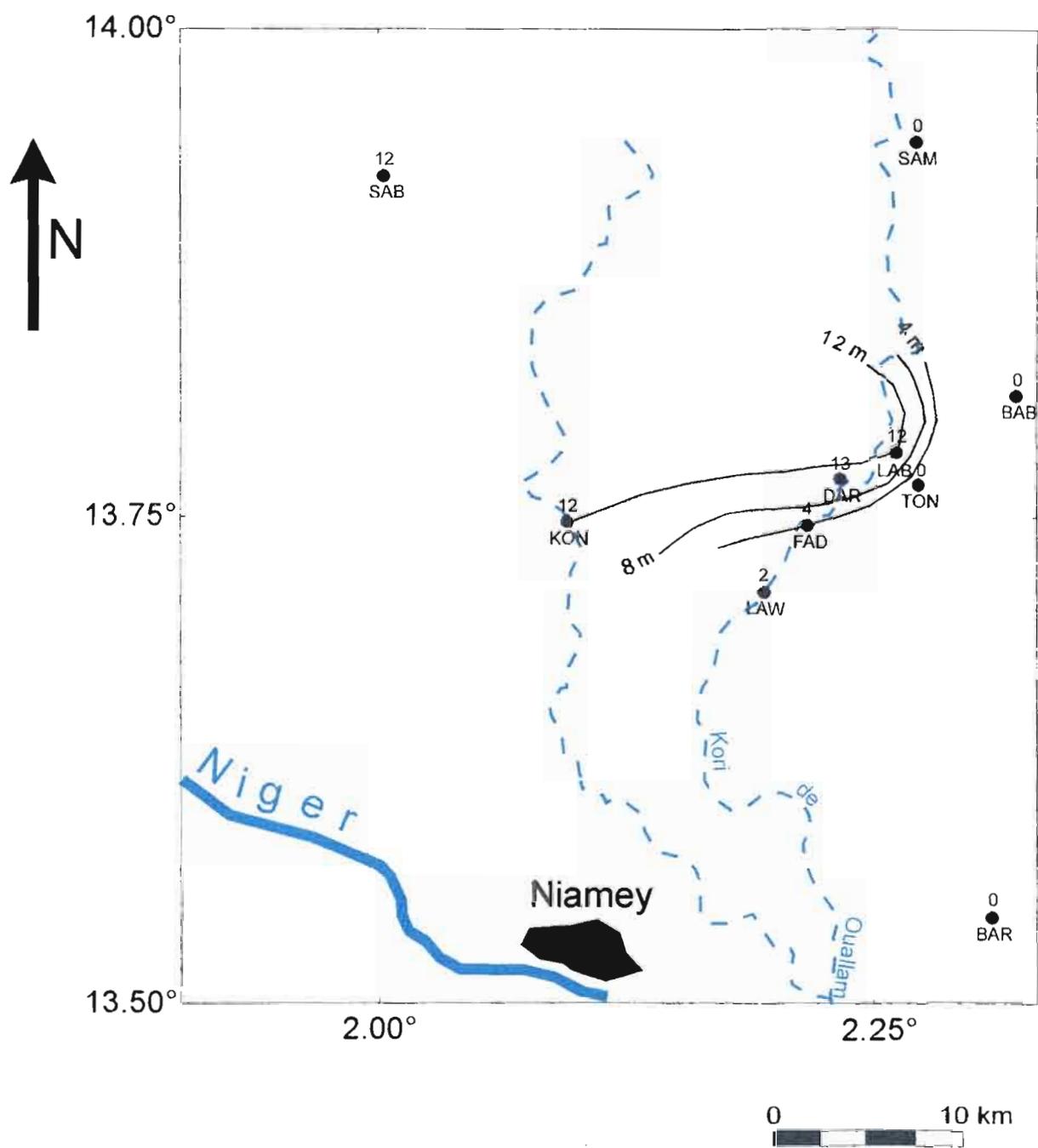


fig.III-4 : Epaisseur des altérites

Epaisseur (m)  
 ●  
 Village

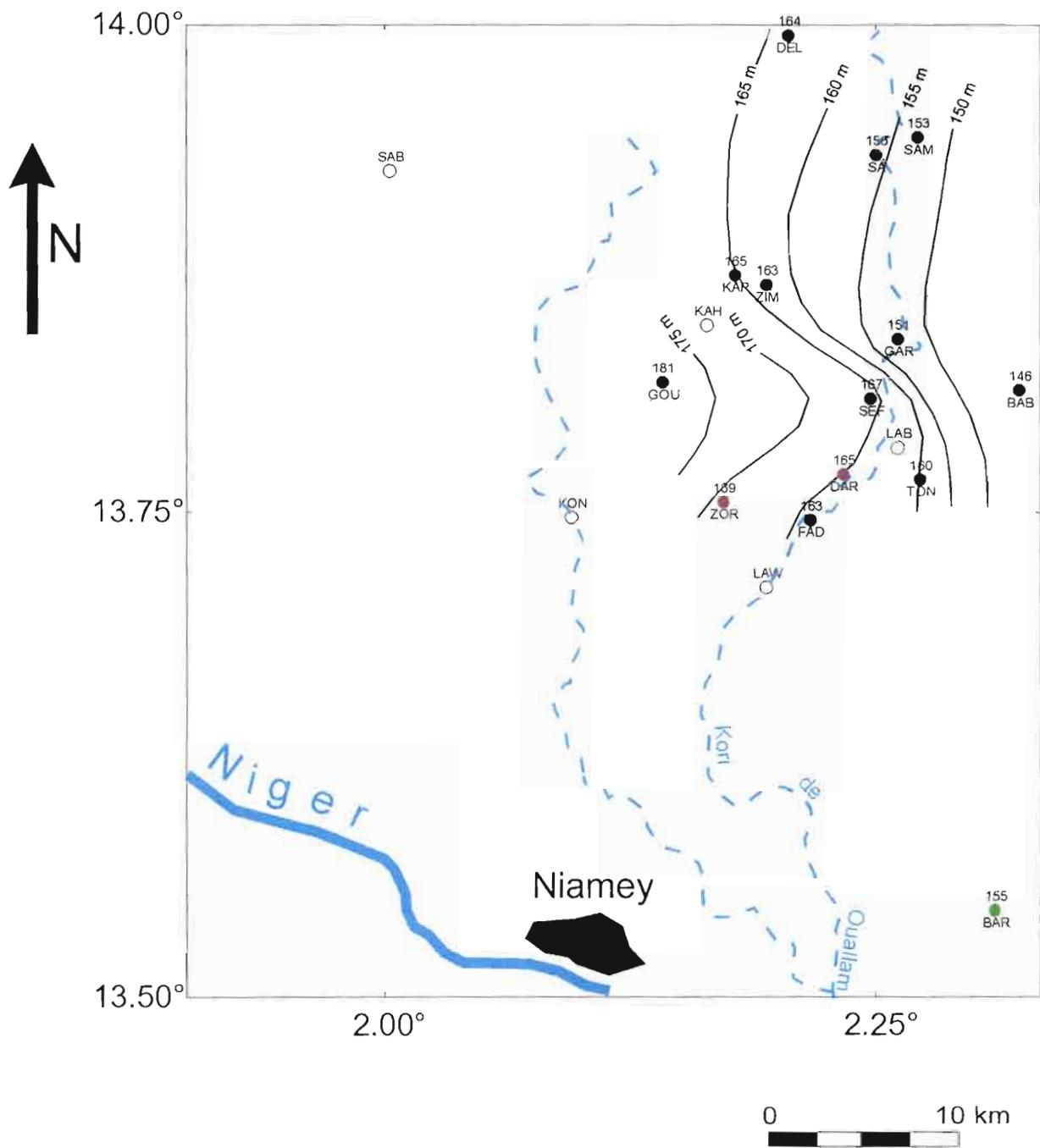


fig.III-5 : Sommet de l'aquifère des sables inférieurs

- |   |  |
|---|--|
| <p>Altitude (m)</p> <p>●</p> <p>Village</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● type S1: sables moyens à grosiers</li> <li>● type S2: sables fins</li> <li>● type S3: silts argileux</li> <li>○ sables absents</li> </ul> |
|---|--|

### III-2-2-2 Extension latérale

Les sables semblent assez bien répartis sur l'ensemble de la zone où les coupes de forages sont présentes. La formation disparaît toutefois à l'ouest : elle n'est plus observée sur les forages de Sabon Gari et de Kone Beri.

A Gounou Bangou, les sables s'amincissent et passent à 2 m (fig. III-6). Cette remarque laisserait supposer que la formation des sables inférieurs disparaîtrait donc par amincissement. La limite de cet aquifère se situerait donc juste à l'est de l'affluent du kori de Ouallam.

Il faut noter qu'on observe des forages où la formation disparaît alors qu'elle est présente sur les coupes voisines. On peut citer l'exemple de Labou Titiloua où les sables sont absents alors que les coupes des forages voisins situés seulement à quelques kilomètres signalent la présence de ce niveau sur des épaisseurs non négligeables : 8 m pour Sefo, 8 m pour Tondi Gamey et 6 m pour Dare Gourou Brahima (fig III-6). Ces absences pourraient être dues soit à des lacunes lors de la sédimentation, soit à des variations latérales de faciès faisant passer de dépôts grossiers (aquifères) à des dépôts plus fins (imperméables), soit à une érosion des formations juste après leur dépôt. Ces trois hypothèses sont cohérentes avec le caractère continental de la sédimentation dans un environnement fluvial et lacustre (cf. I-2-2-2). Dans les trois cas, du point de vue hydrogéologique, cela signifie que la formation aquifère est interrompue.

Ces remarques sont importantes car elle souligne une fois de plus le caractère complexe de la sédimentation du Continental Terminal et montre qu'il faut prendre avec précaution les interprétations faites sur un petit nombre de forages.

### III-2-2-3 Extension verticale

Le toit des sables est formé par des argiles grises à passé plus ou moins ligniteux.

La formation repose soit directement, soit par l'intermédiaire de quelques mètres d'argiles grises à verdâtres sur le substratum du Continental Terminal. Les éventuelles relations entre le socle sain et les sables inférieurs seront précisées au III-3-1.

L'épaisseur très variable est comprise entre 2 m à Gounou Bangou et 16 m Karey Bangou (fig. III-6).

## III-2-4 Aquifère des oolithes

### III-2-4-1 Lithologie et continuité

Après une première lecture, il est possible de distinguer 3 types de faciès :

-**type O1** : les *oolithes ferrugineuses* à proprement parler ou *oolithes argileuses*, ces oolithes représenteraient des formations où les grains oolithiques domineraient la matrice qui les renferme.

-**type O2** : les *argiles et oolithes*, cette description laisse supposer qu'inversement la matrice argileuse dominerait les grains d'oolithes. De ce fait, ce type de formation pourrait être considéré comme non aquifère. Mais plusieurs coupes de forage montrent qu'elle a été crépinée, ce qui laisse supposer qu'elle est aquifère.

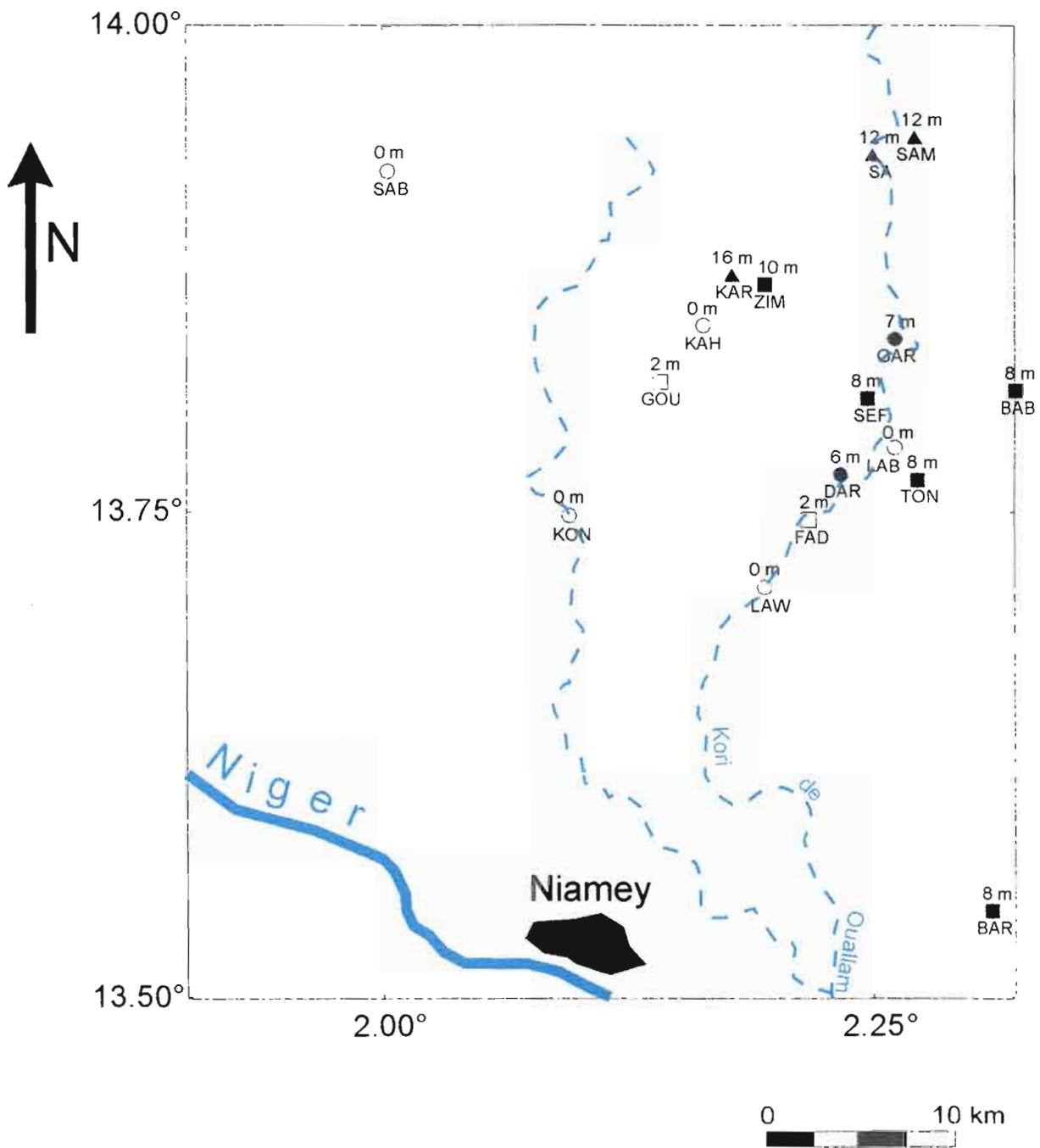


fig.III-6 : Epaisseur des sables inférieurs



**-type O3** : les *silts et oolithes* ou *sables et oolithes*, ces formations contiendraient des matrices à grains plus grossiers.

Hormis pour les oolithes de type O2, il ne semble pas y avoir de répartition géographique spécifique des types d'oolithes. Les oolithes de type O1 ne sont présentes que sur les forages de Dey Tegui, de Yete Kouara et de Wari (fig. III-7). Les oolithes de type O2 semblent se concentrer dans le centre-est de la zone d'étude entre les latitudes 13,74 et 13,85 et les longitudes 2,14 à 2,33. On peut remarquer que certaines formations de ce groupe présentent un petit banc d'oolithes franches (ressemblant à des oolithes de types O1) de 2 à 3 m d'épaisseur dans leur partie supérieure : forages de Yete Kouara, Zori Bangou, Sefo, Tondi Gamey. Les oolithes de type O3 sont présentes dans la région de Karey Bangou et de Zimba ainsi qu'à Kone Beri.

Le sommet des oolithes semble avoir un pendage SE-NW (fig. III-7). Une rupture de pente très localisée apparaît entre le site de Kantchi-Bangou d'une part et les forages de Karey Bangou Treuil et de Zimba. On passe d'une différence d'altitude de 14 m sur un peu moins de 4 km soit une pente de  $4 \cdot 10^{-3}$ , valeur un peu forte par rapport à ce qui est connu sur le reste du degré carré (Monfort 1996).

Deux interprétations peuvent être données pour expliquer cette rupture de pente :

- rupture de pente similaire et dans le prolongement de celle observée sur le socle et les sables inférieurs,
- présence d'un niveau lithologiquement plus bas dans la région de Karey Bangou et Zimba.

#### Rupture de pente similaire à celle observée sur le socle et les sables inférieurs

A première vue cette hypothèse semblerait la mieux adaptée. Mais dans la région centre-ouest, la rupture de pente n'est plus observée comme sur le socle et les sables ce qui limite la validité de cette hypothèse.

#### Présence d'un niveau lithologiquement plus bas dans la région de Karey Bangou et Zimba

La suppression des forages de Karey Bangou et de Zimba donne une carte des isobathes à décroissance régulière vers l'est (fig. III-8). On pourrait donc penser que les niveaux oolithiques de ces deux sites appartiennent à une formation différente. Cette hypothèse est renforcée par le fait que le faciès est différemment décrit à Karey Bangou et Zimba (type O3, matrice silto-argileuse).

Un autre argument est la différence de conductivité relevée entre les forages de Yete Kouara (environ  $1158 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) et de Dey Tegui ( $800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) et le puits-forage de Karey Bangou Lori Kouara ( $1380 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Cependant les plus faibles minéralisations observées sur les deux premiers forages pourraient être dues au fait que les nappes des oolithes et du CT3 se mélangeraient dans ces zones (cf. III-3-3).

La chimie ne peut pas nous apporter plus d'indices. Nous rappelons que peu d'informations chimiques sur l'aquifère des oolithes sont disponibles dans cette zone (cf. II-3). Seul le puits-forage de Karey Bangou Lori Kouara possède une description chimique et isotopique complète. Les données chimiques sur les forages de Dey Tegui et Yete Kouara sont issues d'analyses chimiques relevées dans les dossiers BRGM (cf. II-1-1).

Pour confirmer l'une ou l'autre de ces hypothèses, il faudrait faire une étude plus détaillée de la zone avec un maillage de coupes de forages plus fin. En conclusion faute de données

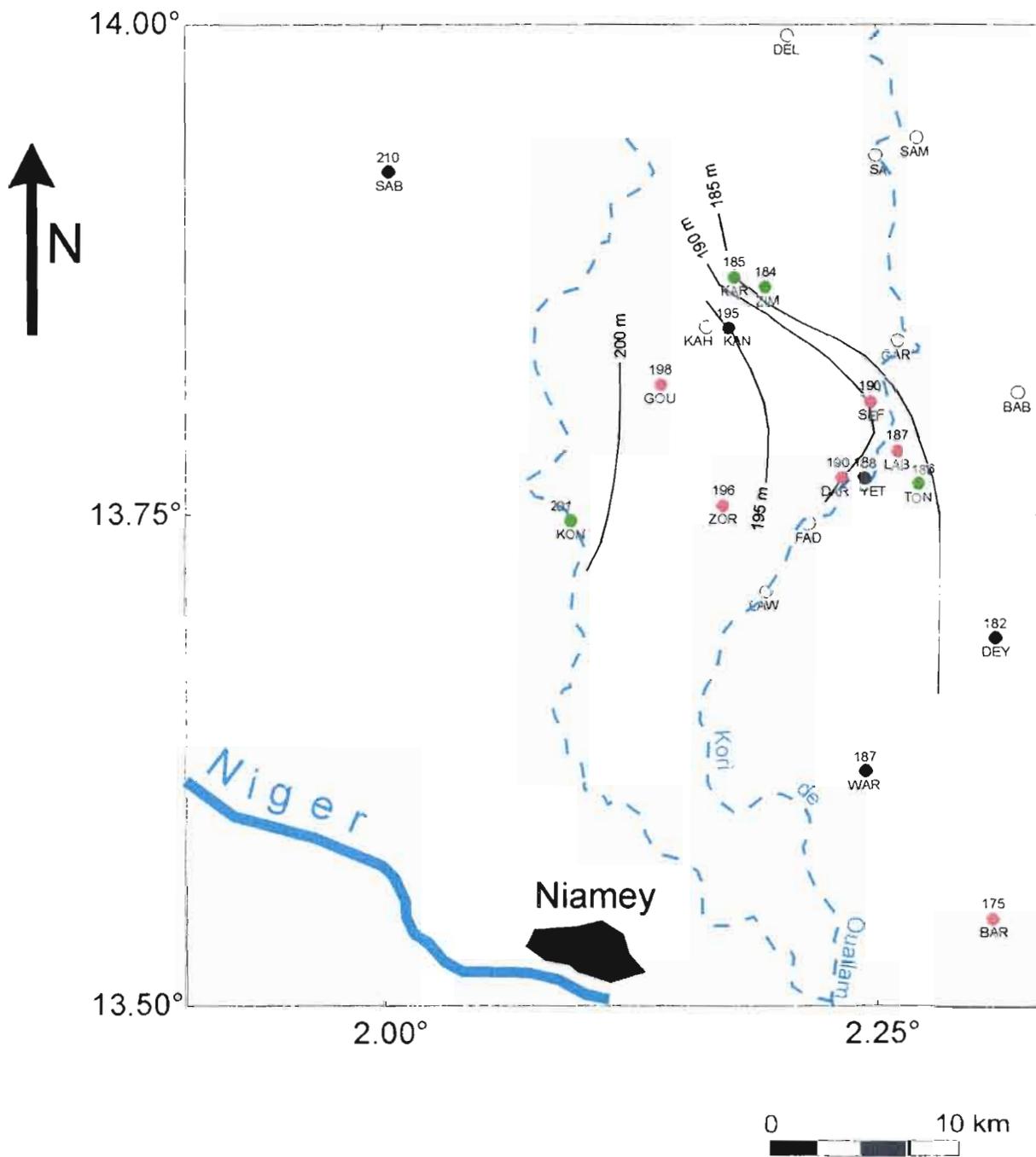


fig.III-7 : Sommet de l'aquifère des oolithes

- Altitude (m)
- Village
- type O1: oolithes ferrugineuses et oolithes argileuses
- type O2: argiles et oolithes
- type O3: silts et oolithes ou sables et oolithes
- oolithes absentes

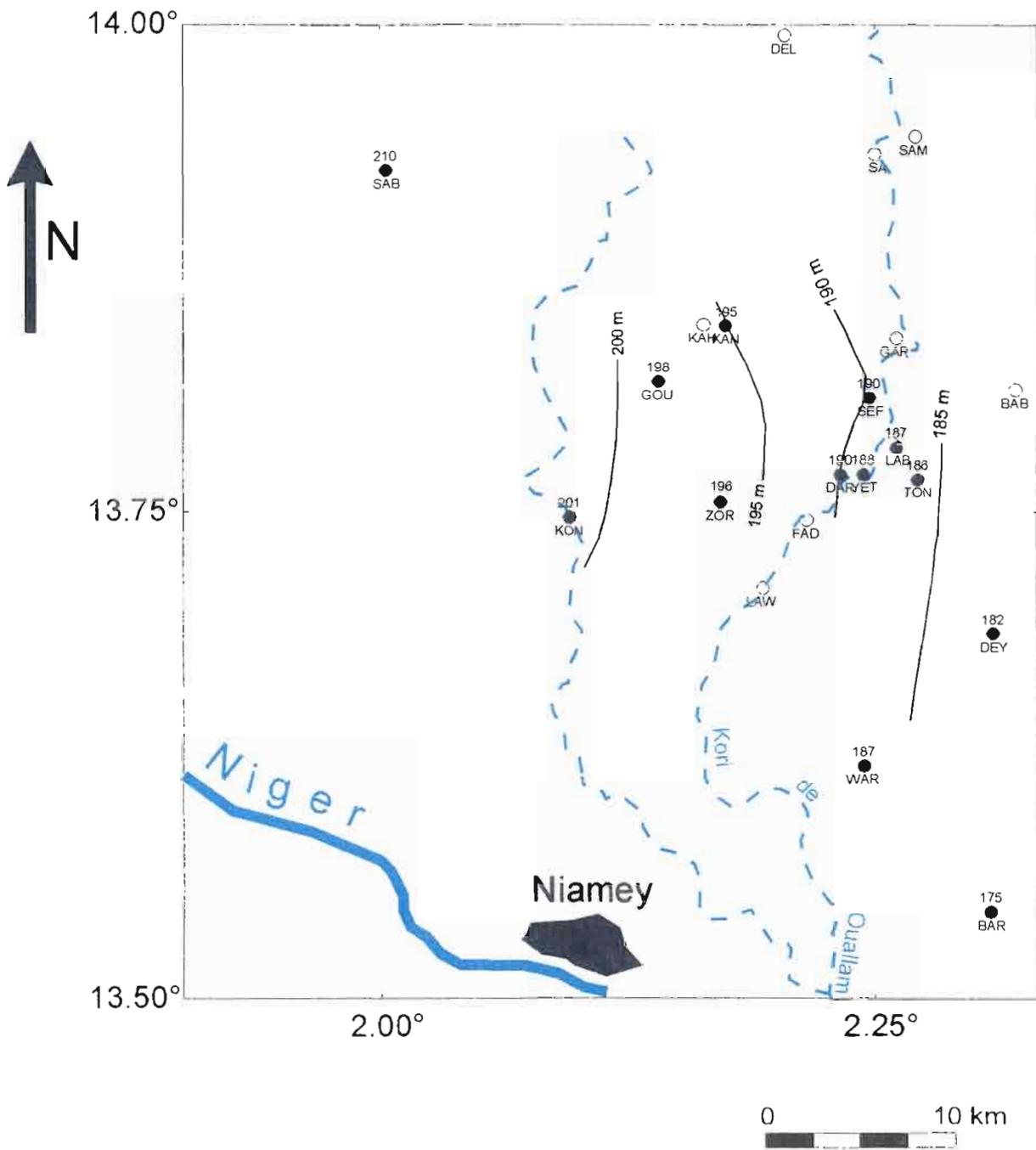


fig.III-8 : Sommet de l'aquifère des oolithes sans les niveaux de Zimba et Karey Bangou

Altitude (m)

●  
Village

○ oolithes absentes

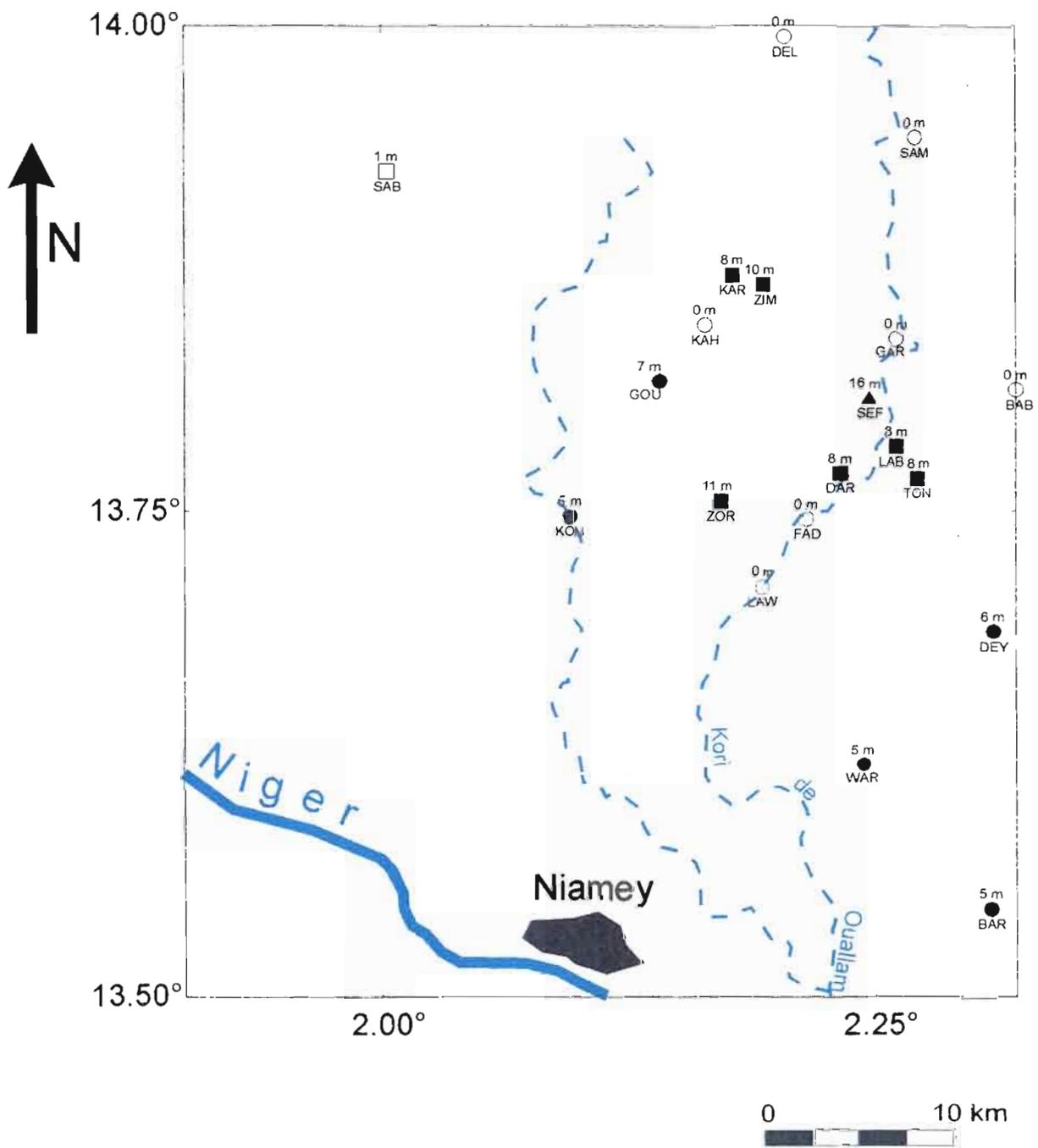
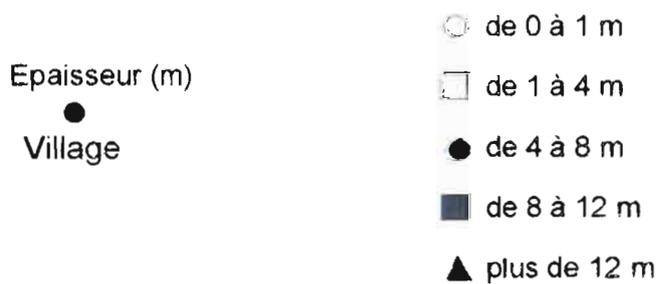


fig.III-9 : Epaisseur de l'aquifère des oolithes



supplémentaires, il n'est pas possible d'affirmer que le niveau oolithique carté sur notre zone est unique. Faute de mieux il sera considéré comme tel par la suite.

### **III-2-3-2 Extension latérale**

#### Extension lithologique

Les oolithes sont absentes dans toutes la partie nord-ouest de la zone (fig. III-7). Cette zone correspondrait donc à une lacune sédimentaire régionale.

Plus au sud, le même phénomène est observé pour les deux villages voisins de Fada Tokobinkani Zarma et de Lawey. Ici deux hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette absence :

- soit cette zone correspond à une lacune sédimentaire comme dans le nord-est,
- soit la formation aurait pu être érodée puis remaniée par l'ancien cours d'eau correspondant au kori de Ouallam à un moment où son niveau de base aurait été plus bas.

En effet, les deux forages se situent à proximité du kori. De plus, on retrouve sur la coupe du forage de Lawey des traces d'oolithes dans des argiles latéritiques marrons, formation peu commune dans le Continental Terminal. Ceci pourrait être assimiler à une formation du Continental Terminal remaniée par l'érosion du kori.

En outre, les oolithes sont absentes à Kahlen Gourou alors qu'elles sont présentes dans les forages voisins. Cette lacune locale illustre une fois de plus la difficulté de carter ces formations, difficulté issue de la complexité des processus sédimentaires en milieu continental. Un autre bel exemple est la transition brutale entre Sefo et Gardama Kouara, villages séparés d'environ 4 km. Un niveau de 16 m est repéré à Sefo tandis que les oolithes sont absentes à Gardama Kouara (fig III-9).

En ce qui concerne les limites de la formation vers l'ouest, tout le raisonnement est basé sur les forages de Sabon Gari et Kone Beri. Un niveau peu épais (1 m) y a été repéré ce qui laisserait supposer que la formation disparaîtrait au-delà de Sabon Gari par amincissement. Cependant il faut prendre avec précaution cette supposition. Ce forage est isolé des autres. Nous ne possédons pas de coupe de forage entre Sabon Gari et Gounou Bangou. On ne peut donc avoir la certitude que ce niveau fait vraiment partie de la formation ou appartient à un niveau supérieur présent dans le CT3 d'autant plus qu'on retrouve sous ces oolithes des argiles jaunes qui sont plutôt typiques des formations du CT3.

De ce fait, il est difficile de connaître avec précision la limite à partir de laquelle la formation disparaît vers l'est. Dans le cas où le niveau de Sabon Gari appartient à la formation, la limite se situerait à l'est de ce point et les oolithes disparaîtraient par amincissement. Dans le cas contraire, la limite se localiserait entre ce forage et les premiers villages plus à l'est : Kone Beri et Gounou Bangou.

#### Extension hydrogéologique

La formation oolithique a été crépinée, dans six forages et notamment jusqu'à Gounou Bangou ce qui permet d'admettre que malgré l'importance de la matrice argileuse, les oolithes seraient aquifères dans la partie est jusqu'à Gounou Bangou. Cependant sur les forages de Laboutitiloua, Barkiawel Beri et Gounou Bangou, elles ont été crépinées avec un autre niveau aquifère ce qui laisse subsister un doute sur leurs qualités hydrauliques.

En outre, les forages de Sabon Gari et de Kone Beri sont secs. Cette tendance est confirmée sur le site de Bane Beri qui se situe plus au nord-ouest légèrement à l'extérieur de notre zone (Monfort, 1996). Ceci laisse penser qu'aucune des formations profondes rencontrées sur ces deux forages n'a un caractère suffisamment aquifère pour être captées. Du point de vue hydrodynamique, ces niveaux oolithiques ne seraient donc pas intéressants. Comme pour les sables inférieurs, la limite hydrogéologique de la formation oolithique se situerait donc juste à l'est de l'affluent du kori de Ouallam.

### **III-2-3-2 Extension verticale**

Le mur de l'aquifère est constitué par les argiles grises à lignite. Sur les sites de la bordure est, à Dey Tegui et à Barkiawel Beri, le toit est constitué par un faible niveau d'argile grise, dernier terme de la formation lithologique sensu stricto du CT2 et représentatif du toit de la formation sur l'ensemble du degré carré (Monfort, 1996). Sur le reste de la zone, le toit est formé d'argile ou de silts argileux de différentes couleurs. Nous verrons que l'imperméabilité des argiles ou la semi perméabilité des silts argileux est relative et qu'ils peuvent contenir de l'eau exploitable par les puits. Cette remarque supposerait qu'il y ait contact entre la nappe phréatique et les oolithes, cette idée sera développée dans la partie III-2-3.

L'épaisseur peut varier de 1 m à plus de 16 m. Les variations peuvent être très brutales. De manière générale la puissance de la formation décroît en allant vers l'ouest (fig. III-9). Une zone d'épaississement est toutefois observable dans le centre-est, lieu de prédilection des oolithes de type O2 (*argiles et oolithes*).

### **III-2-4 La nappe phréatique**

#### **III-2-4-1 Extension latérale**

Sous l'hypothèse que l'ensemble des puits capte la nappe phréatique, cet aquifère s'étendrait donc sur toute la zone d'étude. Toutefois, des considérations hydrodynamiques et géologiques montreront que dans la partie nord-ouest cette nappe est interrompue ou présente des qualités aquifères douteuses (cf. IV-2-3-2).

#### **III-2-4-2 Extension verticale**

Pour comprendre les relations entre la nappe phréatique et les aquifères profonds du Continental Terminal, il est nécessaire de cartographier le mur de cette dernière. Cependant, les différentes tentatives se sont heurtées à des difficultés importantes liées à la structure lithologique de la formation du CT3. En effet, l'aquifère est principalement constitué par les formations perméables du CT3. Or le CT3 constitué d'alternances de multiples lentilles argileuses, sableuses et silteuses, présente des variations latérales de faciès plus fréquentes que les autres formations du Continental Terminal.

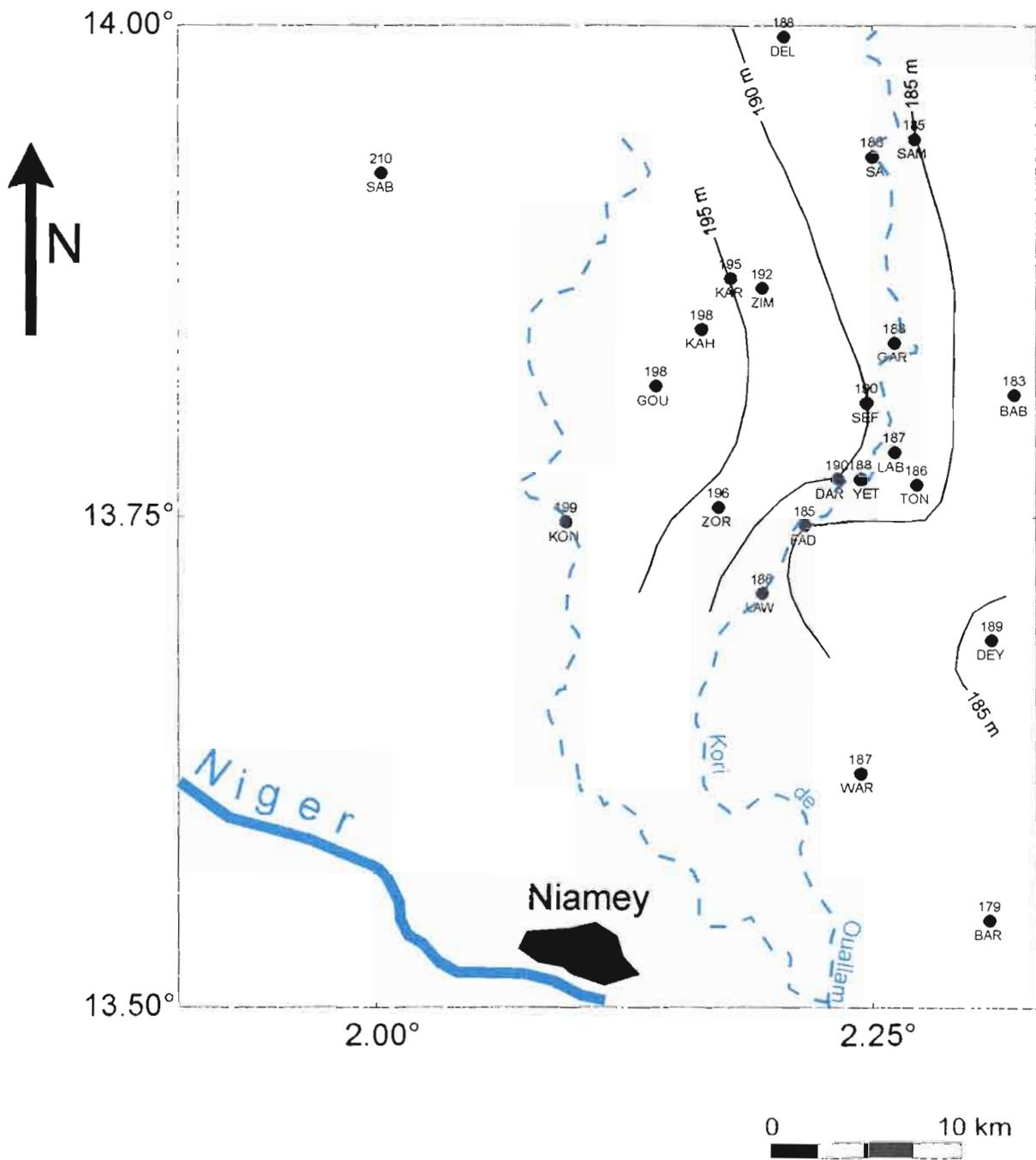


fig.III-10 : Cartographie de la base de la nappe phréatique

Altitude (m)  
 ●  
 Village

Dans un premier temps, nous avons essayé de cartographier la base de la nappe en prenant systématiquement pour mur le premier niveau décrit comme argileux et se trouvant à la base du CT3. Or, il est apparu dans la plupart des cas que le niveau piézométrique de la nappe se situait en dessous de la base de la nappe phréatique ainsi définie ou conférer à la nappe un faible tirant d'eau contradictoire avec ses qualités hydrauliques (cf. IV-2-3-1).

Ce problème peut être expliqué de 2 façons :

- soit par l'imprécision des descriptions (cf. III-1-2-2), les foreurs pourraient qualifier d'argile des formations plutôt silteuses et donc plus aquifères,
- soit par de très fortes variations latérales de faciès affectant le CT3 qui feraient que deux points situés à une centaine de mètres l'un de l'autre auraient des lithologies différentes. La lithologie observée dans le forage ne se retrouverait donc pas au niveau du puits voisin utilisé pour la mesure piézométrique.

Cette dernière supposition rendrait difficile voire impossible une cartographie rigoureuse de la base de la nappe phréatique avec les données dont nous disposons. Aussi partant sur la première hypothèse, nous avons essayé de cartographier la base du CT3 sur le principe suivant : lorsque le niveau piézométrique se situe dans un niveau décrit comme argileux, cette formation est considérée malgré tout comme aquifère.

Ici, nous nous sommes heurtés à un autre problème. Le fait de considérer ces formations comme aquifères conduit bien souvent à poser la base de la nappe sur le sommet des oolithes. Il est donc nécessaire de prendre cette hypothèse avec précaution. En effet, il faut garder à l'esprit qu'un des buts premiers de cette partie est de caractériser les relations géométriques entre les aquifères. Il ne faut donc pas attribuer arbitrairement des contacts entre l'aquifère des oolithes et la nappe phréatique.

Pour éviter cela, il est possible de se fier aux mesures de conductivités (faites lors de campagne de mesure piézométrique ou relevées dans les analyses chimiques des dossiers BRGM (cf. II-1-1)). En effet, la minéralisation de certains puits prêche en faveur de l'existence de contacts entre la nappe phréatique et l'aquifère des oolithes en certains endroits (voir plus loin III-3-3).

Cependant même avec cette méthode, des contradictions subsistent. Par exemple sur le forage de Karey Bangou Lori Kouara, la méthode viendrait mettre en contact la nappe du CT3 et l'aquifère des oolithes alors que l'historique du puits-forage démontre le contraire.

Selon les villageois le puits a été creusé une première fois jusqu'à 40 m. Il donnait alors une eau peu minéralisée et en faible quantité. Il a donc été surcreusé quelques mois plus tard, jusqu'à 70 m de profondeur où il a atteint une nappe plus salée mais de meilleure qualité hydraulique. La comparaison avec la coupe du forage voisin Karey Bangou Treuil situé à une centaine de mètres permet de dire que le premier niveau aquifère serait la nappe phréatique et le second l'aquifère des oolithes. Les deux nappes seraient bien différenciées sur ce site alors qu'on aurait tendance à les mettre en contact. Ceci démontre bien les limites de cette seconde méthode.

Toutefois en synthétisant les données géologiques, chimiques et en anticipant sur les résultats fournis dans la partie hydrodynamique, nous avons tout de même essayé de donner une cartographie de la base de la nappe phréatique (fig. III-10). Cette interprétation est très subjective et discutable.

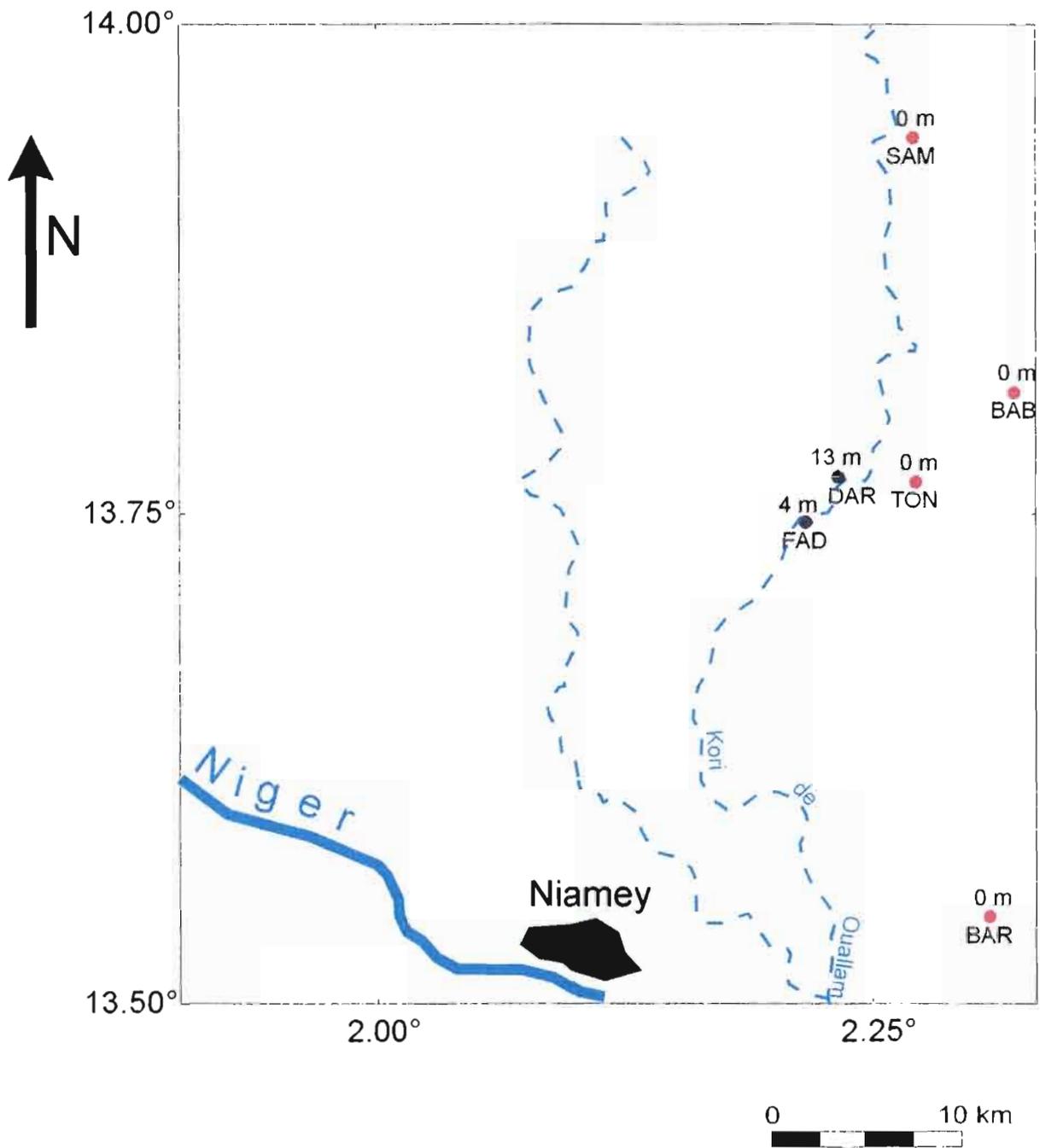


fig.III-11 : Epaisseur de la formation imperméable entre le socle et les sables inférieurs

Epaisseur (m)



Village



sables inférieurs en contact avec le socle

## **III-3 RELATION GEOMETRIQUE ENTRE LES DIFFERENTS RESERVOIRS**

### **III-3-1 Relation entre le socle et les sables inférieurs**

Dans la majorité des cas, le socle sain est séparé des sables inférieurs par l'intermédiaire d'une couche d'altérites argileuses blanches ou verdâtres et/ou d'une fine formation de kaolinite. Cet ensemble peut être considéré hydrogéologiquement comme une seule formation imperméable.

La puissance de cette formation est donnée en figure III-11. L'épaisseur est caractérisée par une forte variabilité : de 4 m à Fada Tokobinkani Zarma à 13 à Dare Gourou.

Cette formation semble disparaître à l'est du Kori de Ouallam. Dans cette zone les sables inférieurs reposent directement sur le socle sain en quatre points : Samari Maisoso, Baba Kaïna Kouara, Tondi Gamey et Barkiawel Beri. Il pourrait donc y avoir contact entre les deux réservoirs dans cette région.

### **III-3-2 Relation entre les sables inférieurs et les oolithes**

Les niveaux des sables inférieurs et des oolithes ferrugineuses sont généralement séparés par une formation bien identifiée dite des argiles grises à lignite et qui peut être décrite dans ses nuances comme gris-blanche à gris-noire.

L'épaisseur de cette formation est assez homogène : de 10 m à Gounou Bangou à 17 m à Dare Gourou et Tondi Gamey (fig. III-12). Dans le sud-est la formation aurait tendance à être plus épaisse (entre 15 et 17 m).

La cartographie de ce niveau démontre bien qu'il n'y a pas de relation géométrique entre les sables inférieurs et les oolithes. Il ne peut y avoir d'échange par simple contact entre les deux formations. Un échange par drainance n'est pas exclu. Mais le caractère peu perméable de cette aquiclude souvent évoqué dans les études antérieures (Abdoulkarimou, 1988 et Monfort, 1996) pourrait limiter fortement l'apport.

### **III-3-3 Relation entre les oolithes et la nappe phréatique**

La formation aquiclude, quand elle existe, est constituée par les argiles grises à lignite au sud et un niveau argileux de couleur jaunâtre dans la région de Zimba et de Karey Bangou.

On observe au centre une large zone définie par les degrés de latitude 13,50 et 13,85°N et les longitudes 2,10° et 2,30°E où la base de la nappe phréatique reposerait directement sur les oolithes (fig. III-13). Les deux nappes seraient en contact facilitant ainsi les phénomènes d'échange. Des informations sur la conductivité de la nappe du CT3 nous permettent d'étayer cette hypothèse. En effet, les puits de Yete Kouara et de Tondi Gamey présentent des conductivités élevées atypiques de la nappe phréatique.

Paradoxalement, on ne retrouverait pas ces fortes minéralisations sur les forages voisins (Labou Titiloua par exemple) sauf à Fada Tokobinkani Zarma. Ceci pourrait être dû aux faibles

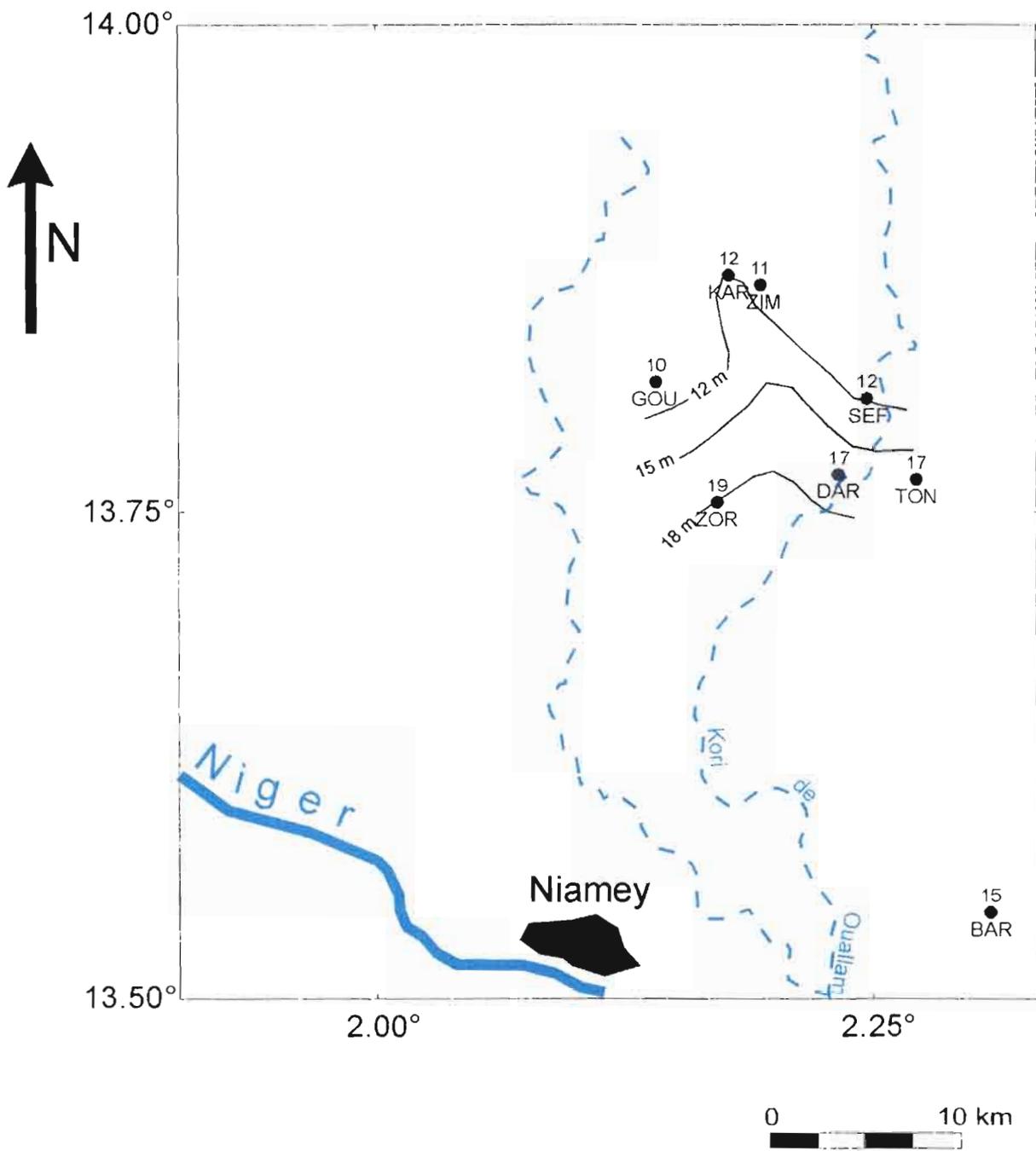


fig.III-12 : Epaisseur de la formation imperméable entre les sables inférieurs et les oolites

Epaisseur (m)  
 ●  
 Village

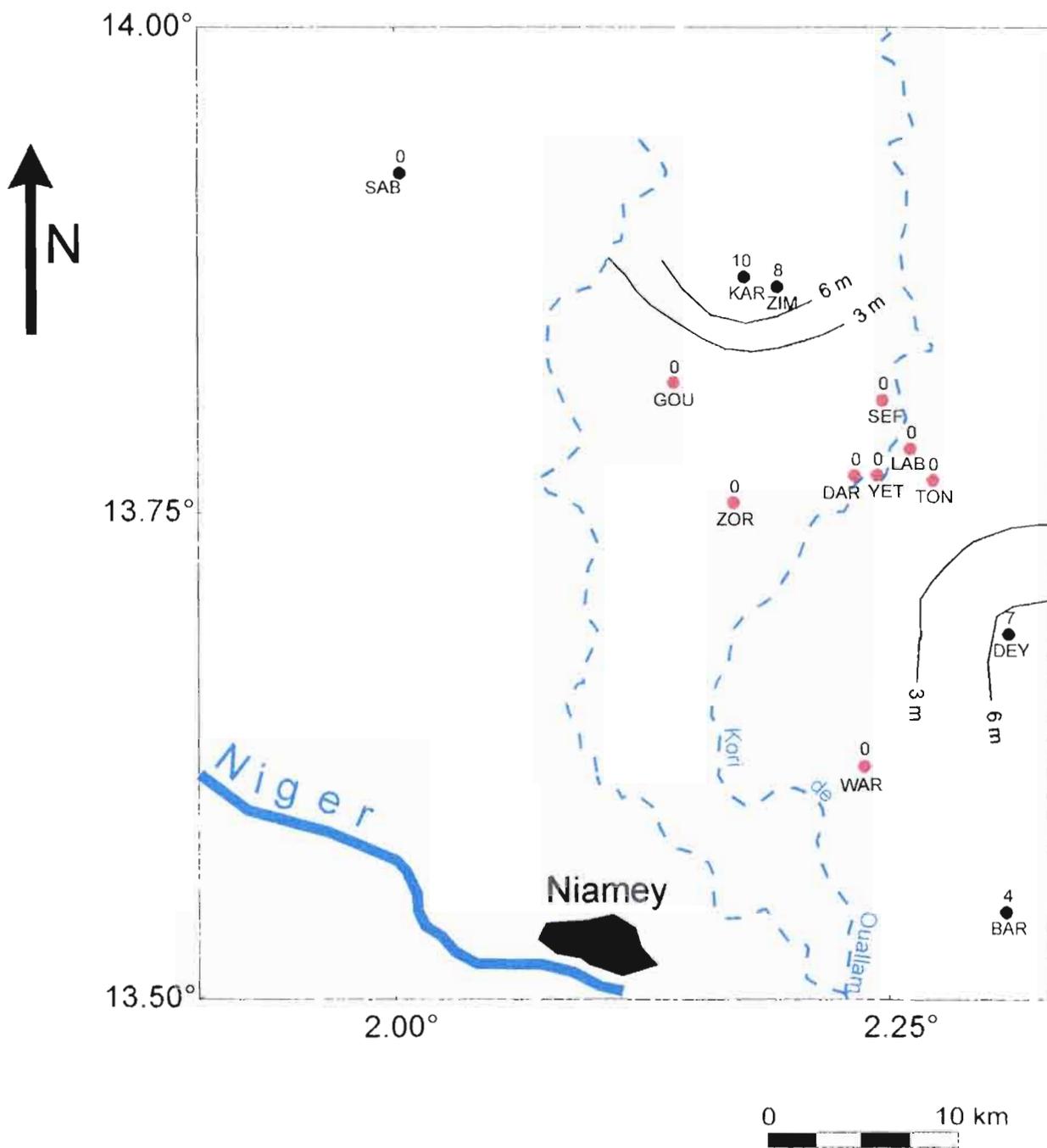


fig.III-13 : Epaisseur de la formation imperméable entre les oolites et la nappe phréatique

Epaisseur (m)



Village



nappe phréatique en contact avec les oolites

transmissivités latérales caractérisant la nappe comme évoquées par Leduc et al. (1996) pour expliquer l'hétérogénéité spatiale des teneurs en tritium.

Au nord de cette zone, dans la région de Zimba et de Karey Bangou, les deux aquifères seraient séparés par un niveau argileux variant de 10 m à 8 m. Au sud, le niveau serait moins constant variant de 4 m à Barkiawel Beri à 7 m sur le forage de Dey Tegui. Il faut toutefois noter que cette dernière remarque n'est basée que sur deux forages distants d'environ 15 km l'un de l'autre.

### **III-4 CONCLUSION**

A l'issu de ce chapitre, le caractère continu des principaux aquifères et la possible confusion avec des nappes locales restent sujet à controverse. Il existe des indices qui permettent de douter de la continuité ou de l'unicité de ces formations. Ces remarques sont dans chaque cas discutables et ne permettent pas de confirmer ces présomptions.

Ces indices sont les suivants :

- un resserrement des isobathes du socle de direction NW-SE sur une ligne partant de Karey Bangou et aboutissant à Labou Titiloua et qui peut être interprété soit comme une faille soit comme une flexure affectant le socle. Le même phénomène est observé dans les sables inférieurs. Toutefois si l'on retient l'hypothèse d'une faille affectant le socle et datant de la tectonique ayant engendré le synclinal de Dogontoutchi, il n'est pas exclu que le phénomène se soit répercuté sous la forme d'une simple flexure dans les dépôts supérieurs du Continental Terminal synsédimentaires.
- une rupture de pente entre Karey Bangou et Zimba d'une part et Kantchi Bangou d'autre part qui permet de douter de la continuité ou de l'unicité du niveau oolithique.

La faible densité des coupes de forage ne permet de trancher entre les différentes hypothèses. Ces formations seront considérées par la suite comme continues.

Au-delà des disparitions locales, l'extension latérale de chaque nappe a pu être grossièrement définie (fig. III-14).

Les sables inférieurs s'étendraient sur toute la partie est de la zone d'étude avec une limite située légèrement à l'est de l'affluent du Kori de Ouallam.

Les oolithes s'étaleraient sur une zone similaire tronquée de la partie nord-est.

La nappe phréatique serait repérée sur toute la zone. Des considérations hydrodynamiques montreront toutefois une disparition de celle-ci dans le nord-ouest (cf. IV-2-3-2).

L'étude de l'épaisseur des couches imperméables a permis de caractériser les relations entre les différentes nappes.

A l'ouest du kori de Ouallam les sables inférieurs reposent directement sur le socle. Les deux réservoirs sont donc en contact dans cette zone.

L'épaisseur d'argiles séparant la nappe des oolithes et l'aquifère des sables inférieurs est à peu près constante (entre 10 et 17 m). Il n'y aurait donc pas de relations géométriques possibles entre ces deux formations (fig. III-15).

En revanche l'aquifère des oolithes et la nappe phréatique seraient en parfait contact dans le sud-est dans une zone définie grossièrement par les latitudes 13,50 et 13,85°N et les longitudes 2,10 et 2,30°E.

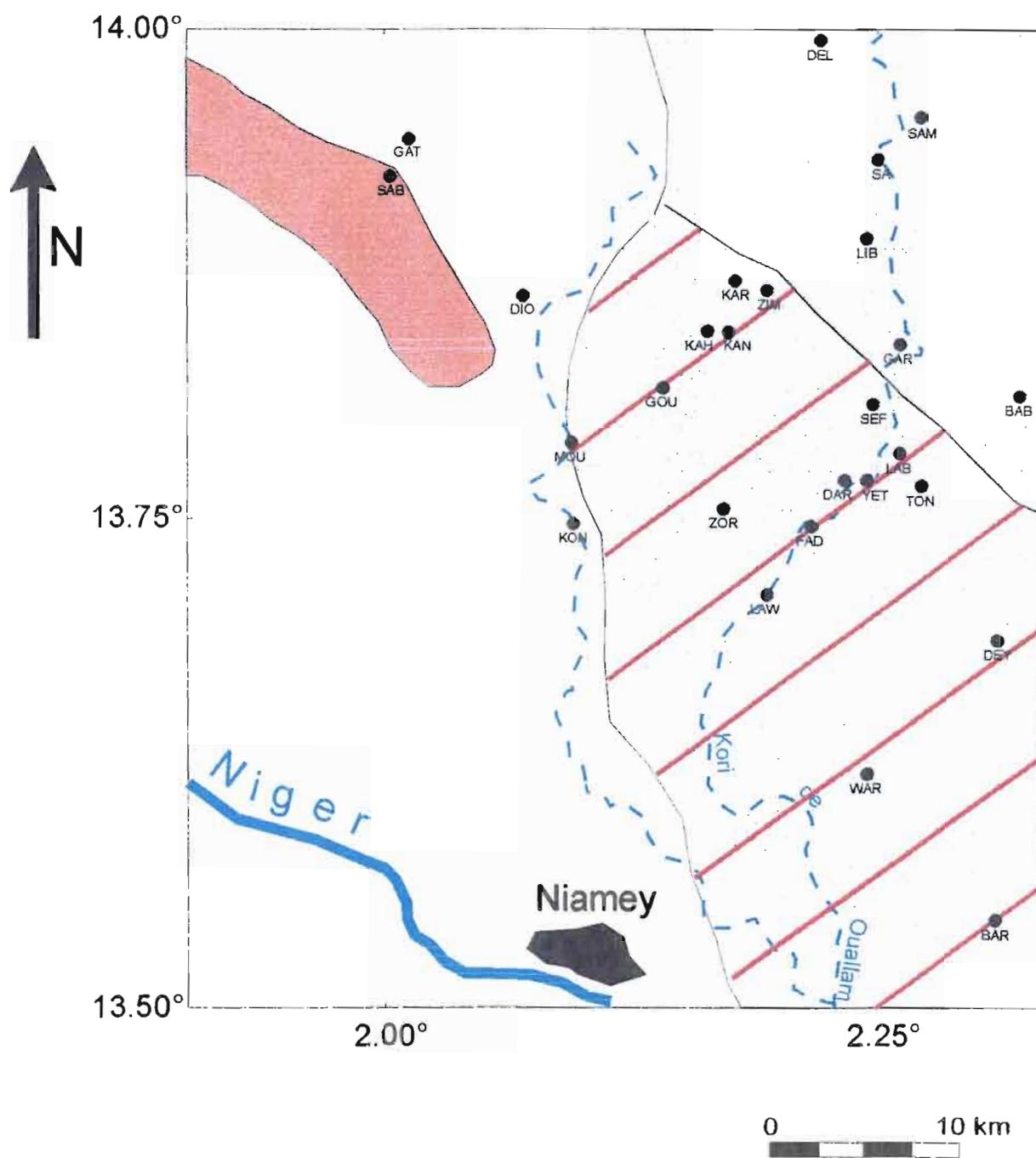


fig. III-14 Extension des différentes nappes

- Village
- aquifère des sables inférieurs
- ▨ aquifère des oolithes
- système phréatique non productif

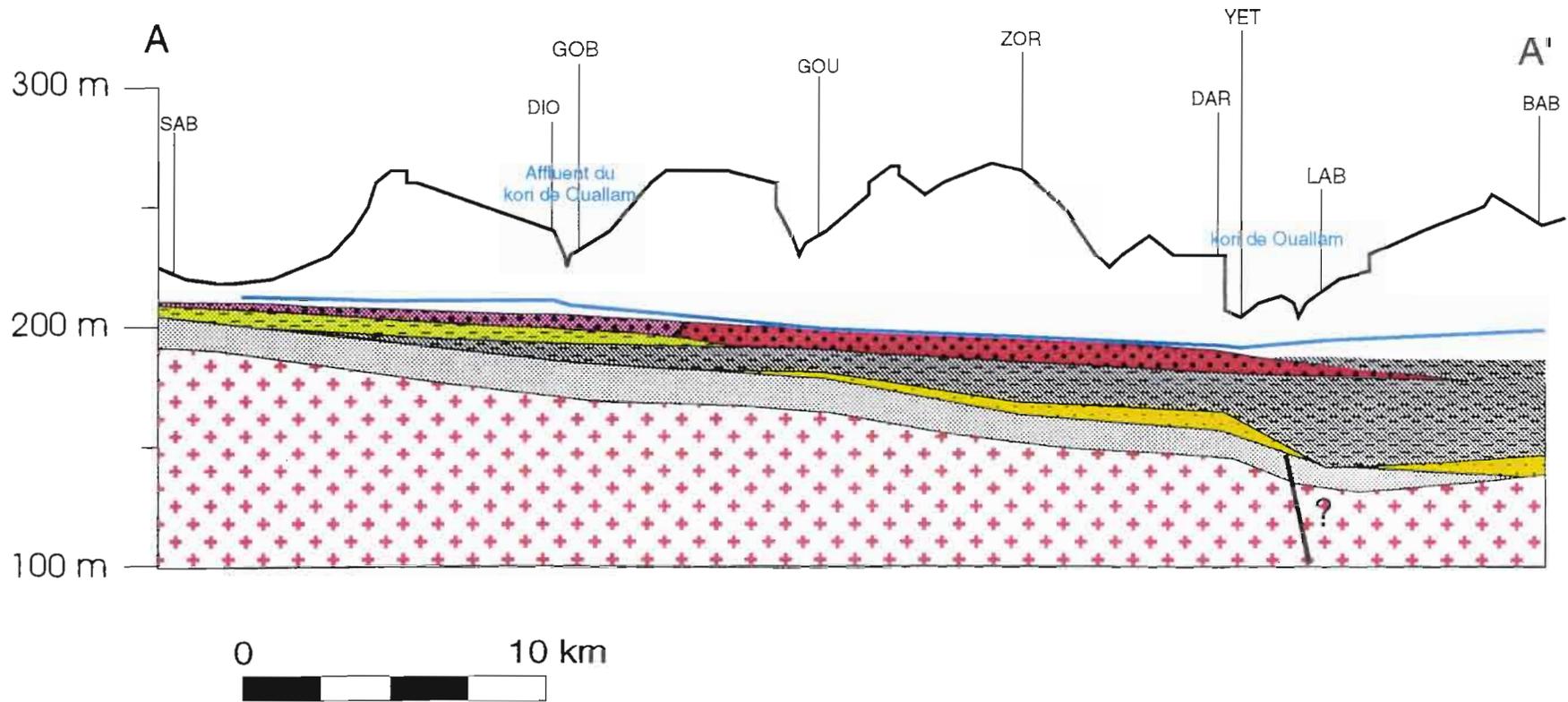


fig. III-15 : Coupe ouest-est (A-A')

- |   |  |   |                          |
|---|--|---|--------------------------|
|  | formation du CT3                             |  | argiles grises à lignite |
|  | oolithes aquifères                           |  | sables inférieurs        |
|  | oolithes non aquifères                       |  | altérites                |
|  | argiles jaunes                               |  | socle                    |
|  | surface piézométrique de la nappe phréatique |   |                          |

Les puits du groupe 3 à forte minéralisation opposent des situations géologiques très différentes.

Les points de Moussa Diolo et de Diolé Goube Kouara se situent en limite des aquifères où l'amincissement des couches imperméables est maximum. Leurs minéralisations pourraient donc s'expliquer par une contamination du profond d'autant plus qu'ils présentent des conductivités proches ou légèrement inférieures à celles de l'aquifère des sables inférieurs. Pour le point de Moussa Diolo cette hypothèse est soutenue par son faciès sulfaté sodique qui se rapproche de celui des aquifères profonds mais est infirmée par des teneurs isotopiques pas franchement démarquées de celles de la nappe phréatique. Par contre les eaux du puits de Diolé Goube Kouara présentent des teneurs ioniques différentes de celles des aquifères du Continental Terminal.

Le puits de Gata Kouara Tegui se situe dans le nord-ouest hors des limites des aquifères profonds. Une contamination par les nappes profondes est donc impossible, ce qui corrobore les conclusions de l'analyse chimique.

Les puits de Libo Atou Kouara sont localisés dans le nord-est. Dans cette zone les oolites sont absentes et la nappe phréatique est séparée des sables inférieurs par une forte épaisseur d'argile (25 à 30 m). La contamination de ces eaux par drainance serait donc négligeable.

Les teneurs isotopiques observées à Fada Tokobinkani Zarma pourraient s'expliquer par le contact entre les oolites et la nappe phréatique. Cependant la formation oolithique est absente sur la coupe de forage. Dans ce cas, ces eaux seraient contaminées par des flux latéraux en provenance des forages voisins où le contact est observable. Cette hypothèse n'explique cependant pas les très fortes minéralisations relevées dans ce puits.

En outre, il est légitime de se demander pourquoi le contact entre les oolites et la nappe phréatique qui devrait se traduire par un mélange entre les deux types d'eau n'a pas été repéré par les méthodes chimiques.

Deux explications sont possibles :

- soit les caractéristiques de l'aquifère des oolites ne sont pas proches de celles des sables inférieurs comme supposé au II-4,
- soit l'apport en eau des oolites est négligeable par rapport à celui de la nappe phréatique, ce qui aurait pour conséquence de masquer les signatures chimiques et isotopiques de l'aquifère.

***Chapitre IV :***  
***Etude Hydrodynamique***



Le but de ce chapitre est de préciser la piézométrie de la nappe phréatique sur la zone d'étude et de comparer les niveaux des divers aquifères en présence, afin de déceler d'éventuelles relations.

Comme pour les parties précédentes, nous disposons d'un jeu de données conséquent. Mais l'interprétation de ces informations a été limitée par un certain nombre d'incertitudes.

## **IV-1 CRITIQUE DES DONNEES**

### **IV-1-1 Données disponibles**

Pour traiter cette partie, les données disponibles étaient les suivantes :

#### Pour la nappe phréatique

-chroniques de niveaux statiques sur 105 puits établies au cours du programme HAPEX-Sahel. Les mesures ont été faites à des intervalles de temps variables pour la plupart des puits. Un petit nombre d'ouvrages possède toutefois des chroniques faites à pas de temps réguliers : hebdomadaires à bimensuels.

#### Pour les aquifères profonds

-des niveaux statiques fournis dans les coupes de forages des dossiers BRGM (utilisées au chapitre III) et de levés piézométriques plus récents établis sur quelques puits-forages de la zone. Sur les 23 forages du BRGM, 9 seulement sont utilisables. Les 14 restants captent plusieurs aquifères. Pour les puits-forages nous n'avons que les 2 ouvrages de Karey Bangou.

Pour les puits, le niveau statique est fourni relativement à la margelle de l'ouvrage. Pour obtenir les niveaux piézométriques à partir des niveaux statiques, il est nécessaire de connaître l'altitude des ouvrages. Pour cela, plusieurs sources d'information sont utilisées :

- diverses campagnes de nivellement effectuées par l'Institut Géographique National du Niger. Ces mesures ont été faites par nivellement simple ou par GPS 3D (Global Positioning System), soit 31 puits sur l'ensemble de la zone.
- les cartes au 50 000<sup>e</sup> à partir desquelles il est possible d'estimer une altitude approximative, les coordonnées des ouvrages ayant été préalablement mesurées au GPS 2D.

Pour les aquifères profonds, trois forages seulement sont nivelés. Le petit nombre de points concernant chaque aquifère ne permet pas l'établissement de courbes isohydrohypes. A titre indicatif, une carte avec les niveaux piézométriques ponctuels de chaque forage sera fournie.

### **IV-1-2 Incertitudes**

Comme au chapitre précédent, nous avons été confrontés à deux grands types d'incertitudes : incertitudes sur l'estimation des altitudes et sur la validité des niveaux statiques mesurés.

#### **IV-1-2-1 Sur l'estimation des altitudes**

Partant sur le principe que les points nivelés étaient d'une entière fiabilité, nous avons essayé d'estimer par comparaison, l'erreur commise sur l'estimation des altitudes d'après la carte. Les 31 points nivelés ont été positionnés sur la carte où nous avons pu facilement comparer les altitudes fournies par ce document et la valeur du nivellement. Il est apparu des différences considérables en certains points. Huit puits ont montré des décalages de plus de 10 m. Comme cas extrême, le puits de Diolé Goubé montrait un décalage d'environ 15 m.

Ces observations ont amené un soupçon certain sur la validité des cartes topographiques de cette région. De telles erreurs rendaient quasiment inutilisables ces documents pour l'établissement de cartes piézométriques fiables.

Afin de lever le doute, un dépouillement scrupuleux des résultats des campagnes GPS a été effectué. Ces résultats sont présentés sous forme de différence d'altitude entre deux stations successives. Ces stations s'alignent le long d'un tracé regroupant l'ensemble des points constituant la campagne de mesure. Ce tracé est relié à une borne IGN grâce à laquelle les dénivelés sont retraduits en altitudes absolues. Il a donc fallu calculer les altitudes des 31 points afin de remonter à celles des 8 points aberrants. A l'issue de cette opération, il est apparu que des erreurs de signe dans les calculs de dénivelés avaient engendré les décalages observés.

Les altitudes ainsi corrigées se sont révélées plus proches de celles établies sur carte. Il a donc été possible d'établir de façon plus rigoureuse l'erreur d'estimation des altitudes d'après les cartes. De manière générale, on peut dire qu'elle est inférieure à 5 m puisque l'erreur maximum relevé sur le puits de Kone Beri est de 4,55 m.

Cette estimation exclut toutefois le site de Dey Teguy où il subsiste un décalage de 10 m. Il n'a pas été tenu compte de cette erreur car la carte au 50 000<sup>e</sup> concernant la zone est vieille et peu fiable et de surcroît contient peu de puits du réseau.

L'erreur d'estimation sur carte est provoquée soit par l'imprécision des cartes, soit par le pouvoir de résolution du GPS2D :

##### L'imprécision des cartes

Les courbes de niveau sont données avec une fréquence de 5m ou de 10m suivant les régions. Les variations topographiques de moins de 5 m sont difficilement repérables.

##### L'imprécision des coordonnées GPS

Elle peut aller dans les cas extrêmes jusqu'à 100m ce qui peut entraîner une erreur importante si le puits se situe à proximité d'un talus comme c'est le cas à Kone Beri.

#### **IV-1-2-2 Sur la validité des niveaux statiques**

##### Pour les aquifères profonds

Les forages ont été faits sur une période comprise entre 1982 et 1988. Aussi, pour être certain de la validité des niveaux piézométriques, il faut s'assurer que ces nappes ne sont pas sujettes aux variations saisonnières ou inter-annuelles. Le Gal La Salle (1994) a fourni des datations au carbone 14 des deux aquifères profonds du Continental Terminal dans la région. Ces eaux ont fourni des âges se situant entre 24 000 et 35000 ans. Ces datations soulignent le caractère fossile des nappes. On peut donc penser qu'elles sont indépendantes des variations naturelles sur quelques années. De plus, il n'y a pas de pompages importants. Hormis les

erreurs d'estimation d'altitude, les niveaux piézométriques peuvent donc fournir des résultats significatifs.

#### Pour la nappe phréatique

Le suivi piézométrique des puits à long terme sur le degré carré de Niamey a souvent soulevé la question de représentativité des mesures ponctuelles dans le temps. Les problèmes apparus semblent liés aux fluctuations saisonnières importantes en certains points et aux effets de pompages qui semblent variables d'un site à l'autre.

Sur les puits proches des points de recharge (cf. I-1-3 et I-3-1-3), d'importantes variations saisonnières sont observées. Ainsi, des fluctuations de plus de 9 m ont pu être relevées sur un des puits de Barkiawel Beri. La distribution des puits à fortes variations saisonnières est très disparate dans l'espace et est liée à la situation géographique de l'ouvrage par rapport aux mares.

Certains sites montrent une importante sensibilité aux pompages. Ceci dépend des perméabilités locales. Les pompages peuvent influencer le niveau statique du puits sur une échelle de temps allant de quelques minutes à la journée. A Fada Tokobinkani Zarma, deux mesures faites à trois heures d'intervalle ont montré une différence piézométrique de 3 m. Des enregistrements continus effectués sur certains puits ont révélé des variations pouvant atteindre 1,50 m entre le jour, période de pompage, et la nuit.

## **IV-2 PIEZOMETRIE RELEVÉE DANS LES PUITES**

### **IV-2-1 Choix de la campagne de mesures**

Au cours d'une année un grand nombre de levés piézométriques est effectué sur l'ensemble des puits du réseau. Mais il n'est pas possible d'utiliser des mesures faites à des intervalles de temps trop éloignés à cause des variations saisonnières. Il est préférable d'utiliser des campagnes de mesures établies sur des périodes inférieures au mois.

La carte a été établie à partir de la campagne de mesures effectuée en décembre 1993. Le choix de cette campagne a été guidé principalement par deux considérations :

- avoir le maximum de puits sur l'ensemble du réseau. En effet, lors des différentes campagnes, tous les puits du réseau ne sont pas mesurés.
- éliminer au maximum les effets des fluctuations saisonnières.

Les variations des points de recharge pendant la saison des pluies pourraient amener des décalages piézométriques non significatifs. Les campagnes effectuées aux mois de juin, juillet, août voire septembre sont donc à exclure.

En outre, l'intensification croissante de la demande en eau en fin de saison sèche accentue les niveaux d'étiage des puits sensibles aux pompages, le rabattement se surimposant à la baisse saisonnière. Les campagnes de fin de saison sèche sont donc à écarter.

Pour établir une carte piézométrique représentative, il est donc nécessaire de choisir une période où ces perturbations semblent être minimales. Le mois le plus approprié semble être le mois de décembre. Pour cette période, nous disposons d'observations sur 58 puits.

## **IV-2-2 Résultats**

Les résultats se présentent sous forme d'une carte piézométrique. Ce document reflète normalement les niveaux relevés dans la nappe phréatique. Les puits aux eaux fortement minéralisées (groupe 3) y sont inclus.

### **IV-2-2-1 Description de la piézométrie**

Deux grandes dépressions sont observables (fig.IV-1) :

- une très profonde au nord-ouest, délimitée par un fort gradient hydraulique, les niveaux passent brutalement d'environ 210 m à 190 m.
- une plus vaste qui semble être centrée sur le Kori de Ouallam, dont la transition avec les rebords plus élevés semble se faire de manière moins brutale.

Des zones à piézométrie élevée bordent ces dépressions. On les rencontre dans les parties nord, sud-ouest et sud-est. Ces régions présentent des niveaux piézométriques homogènes : 210 m environ. Les niveaux nord et sud-est semblent être en continuité.

La partie nord-est de la zone présente une décroissance des niveaux piézométriques plus régulière.

A l'intérieur de la dépression sud-est, se situe un point particulièrement bas et correspondant au puits de Kokiré. Cette dépression locale semble s'amorcer au nord sur les puits de Mayaki Kouara et de Fada Tokobinkani Zarma . Par contre, elle se fait de façon brutale à l'ouest entre Lawey et Kokiré.

### **IV-2-2-2 La dépression nord-ouest**

L'ensemble des informations convergent pour affirmer que les puits de cette zone ne captent plus la nappe phréatique mais un autre aquifère caractérisé par des pressions importantes :

- Les diverses enquêtes de terrain laissent paraître que dans la région de Kano Kouara et de Sabon Gari, il existerait deux niveaux aquifères : une formation superficielle de mauvaise qualité pour l'exploitation (faible réserve d'eau) et un niveau plus profond de meilleure qualité (Favreau, communication personnelle).
- Sur la carte piézométrique (fig IV-1), le point de Kano Kouara Ofedes présente un niveau piézométrique d'environ 190 m caractéristique de la dépression, entre deux points (Kano Kouara clos et Gata Kouara) montrant des piézométries plus élevées de 210 m typiques de la région nord. Ceci peut être interprété comme un recouvrement des deux nappes.

Le niveau aquifère profond pourrait être le socle. Plusieurs arguments militent en cette faveur :

- La coupe du puits de Sabon Gari a révélé que la base du puits atteint le socle.
- Les niveaux piézométriques situés entre 190 et 195 m sont inférieurs au sommet des altérites.

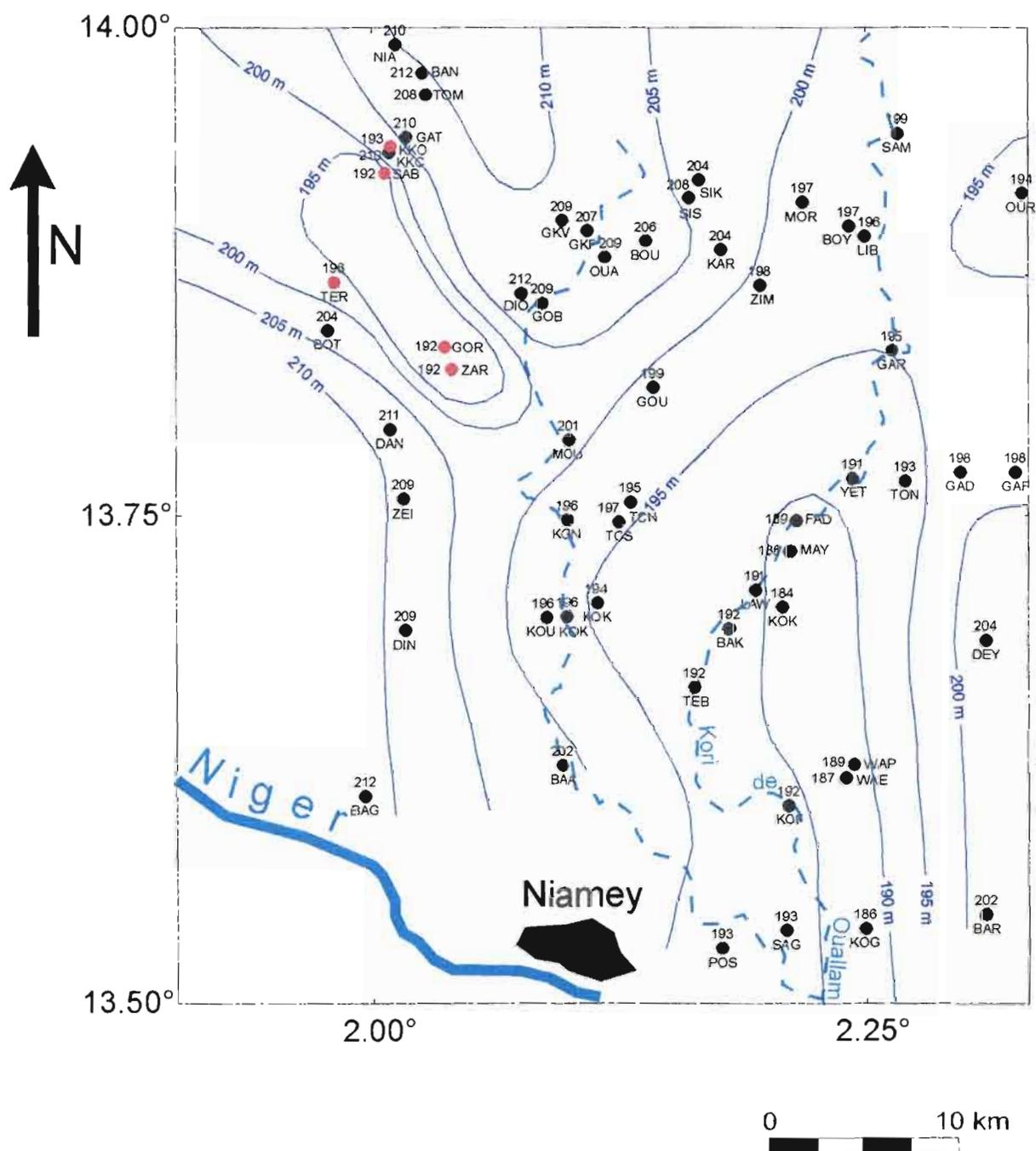


fig.IV-1 : Cartes piézométriques des niveaux relevés dans les puits  
(Décembre 1993)

niveau piézométrique (m)



Village

● puits captant le socle

\* Se reporter à l'annexe V pour l'abréviation des villages

-Les conductivités relevées dans certains puits montrent une minéralisation élevée non caractéristique de la nappe phréatique. Lors des diverses campagnes, les conductivités suivantes ont été mesurées :

- entre 578 et 911  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  à Boyey Tondi,
- entre 2400 et 2940  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  au puits de Kano Kouara Ofedes,
- entre 436 et 559  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  au puits de Sabon Gari Ofedes,
- entre 223 et 390  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  au puits de Sabon Gari Traditionnel cimenté.

Toutefois, ce dernier argument est à manipuler avec précaution, car d'autres puits de la dépression montrent de faibles conductivités typiques de la nappe phréatique :

- entre 40 et 110  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  à Gorou Goussa,
- entre 60 et 115  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  à Zarmarkoy Kouara,
- entre 56 et 104  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  à Tera Boyey Tondi.

Le contraste des conductivités pourrait s'expliquer par le caractère fracturé du réservoir socle. Cette particularité est bien soulignée par les prospections géoélectriques faites dans le nord-ouest de Niamey notamment dans la région de Sabon Gari (Dehays, 1986) et par les quelques forages secs ayant pénétré le socle sur plus d'une dizaine de mètres à Kone Beri et Sabon Gari. Dans ce cas, chaque zone fracturée pourrait avoir ses caractéristiques propres.

#### **IV-2-2-3 La dépression sud**

Trois hypothèses peuvent être émises pour expliquer cette structure hydrogéologique :

- nappe en creux sur une échelle réduite,
- axe de drainage centré sur le kori de Ouallam,
- captage d'un aquifère plus profond,
- rabattement des courbes isopièzes par passage de la nappe phréatique à une roche aquifère de nature différente.

##### Schéma des nappes en creux sur une échelle réduite

Pour expliquer les grandes dépressions fermées observées dans de nombreuses régions du Sahel, Aryanossy (1989) a proposé un schéma basé sur un déficit infiltration/évaporation à long terme. Une des principales hypothèses est que ces nappes sont caractérisées par de faibles transports latéraux, phénomène souvent évoqué pour la nappe du CT3 sur le degré carré (Leduc et al., 1996 ; Leduc et Taupin, 1997). Ce cas pourrait être envisagé à plus petite échelle et expliquer une dépression moins importante.

Cependant le caractère évaporé des eaux de la dépression n'est pas mis en évidence par les isotopes stables. Les teneurs isotopiques observées à l'intérieur de celle-ci ne sont pas plus enrichies que celles observées sur l'ensemble de la zone d'étude.

##### Axe de drainage centré sur le kori de Ouallam

Les alluvions du kori ou des niveaux du Continental Terminal remaniés par l'ancien cours d'eau pourraient servir de drain à la nappe phréatique. En fait, dans le détail l'axe de la dépression se situe un peu à l'est du kori et le phénomène n'est pas observable sur l'affluent du kori de Ouallam, ce qui remet en question cette hypothèse.

##### Captage d'un aquifère plus profond

Comme dans le nord-ouest, la nappe du CT3 disparaîtrait et les puits capteraient un milieu aquifère plus profond. Mais les faits suivants tendent à infirmer cette suggestion :

- Sur les contours de la zone, la surface piézométrique s'abaisse de façon progressive et non brutalement comme pour la dépression nord-est.
- Les minéralisations faibles des puits de la zone et les teneurs isotopiques sont plutôt caractéristiques de la nappe phréatique.

#### Rabattement des courbes isopièzes par passage à une roche aquifère de nature différente

Cette hypothèse semble être la plus probable car elle s'appuie à la fois sur des arguments géologiques, chimiques et hydrodynamiques :

- L'étude géologique a montré la difficulté de cartographier la base de la nappe phréatique et en particulier dans la région centre-est où il a été finalement décidé de mettre en contact la nappe phréatique avec les oolithes (cf. III-2-3).
- De plus dans cette région, les niveaux piézométriques semblent proches de la base de la nappe du CT3 ainsi définie ne laissant qu'un tirant d'eau très faible, 5 mètres maximum (fig. III-15). En outre, les niveaux statiques relevés dans les forages de Yete Kouara et Wari captant l'aquifère des oolithes sont proches de ceux relevés dans les puits (fig. IV-1 et fig. IV-2).
- Les forages de Gounou Bangou F1, de Wari et le puits de Saga Gorou captent un niveau oolithique à faible minéralisation proche chimiquement de la nappe phréatique. La présence d'oolithes extraites des puits de Koné Kaïna Est Route et de Tchangarey Centre (Leduc, communication personnelle) permet de supposer que ces puits seraient dans le même cas que Saga Gorou.

Tous ces faits convergent et soutiennent l'hypothèse que la nappe phréatique serait confondue dans cette région avec le réservoir oolithique. Le rabattement des isopièzes qui engendrent la dépression serait ainsi expliqué par une perméabilité des oolithes plus importante que celle des formations du CT3.

Toutefois les oolithes ne sont pas le réservoir de la nappe phréatique sur toute la zone. Elles disparaissent dans les régions de Lawey et de Fada Tokobinkani Zarma. Ces disparitions locales peuvent être dues à l'érosion des couches superficielles du Continental Terminal à proximité des koris (cf. III-3-3). Toutefois dans ces régions, la nappe phréatique existe et pourrait avoir comme aquifère les alluvions du kori ou les formations du Continental Terminal ramaniées par l'érosion.

Il existe quelques points à minéralisation élevée. Les conductivités se situent aux alentours de  $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  dans les régions de Tondi Gamey et de Yete Kouara et présentent des valeurs comprises entre 450 et  $660 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à Tébonse. Les points de Tondi Gamey et de Yete Kouara pourraient s'expliquer par un apport d'eau des oolithes plus important sur les bordures de la zone de contact. Cependant la singularité du point de Tébonse n'est pas expliquée.

#### **IV-2-2-4 La dépression locale de Kokiré**

Comme pour la dépression sud-est, il serait possible d'évoquer le mécanisme des nappes en creux. Dans ce cas, le rabattement de la région de Kokiré serait une accentuation du phénomène généralisé à la dépression sud-est. Mais les mêmes remarques peuvent être faites à propos du faciès isotopique.

Une autre hypothèse peut être suggérée. Une relation entre le socle et la nappe phréatique pourrait caractériser cette région :

-En effet, sur les forages de Lawey et de Fada Tokobinkani Zarma, les niveaux statiques du socle sont proches de ceux relevés dans les puits de Kokiré, Mayaki Kouara et Fada Tokobinkani Zarma (cf. IV-3).

-L'aquifère des sables inférieurs ne viendrait pas interférer cette relation. Le niveau pourrait être absent de la zone. Il n'est pas repéré sur le forage de Lawey.

-La perméabilité des argiles séparant le CT3 des aquifères profonds est douteuse. A Lawey et à Fada Tokobinkani Zarma les niveaux piézométriques relevés dans les puits se situent dans ces formations.

-Cette hypothèse pourrait expliquer les teneurs isotopiques du puits de Fada Tokobinkani Zarma.

Cependant, les eaux du puits de Kokiré ont des caractéristiques chimiques et isotopiques proches de la nappe phréatique. Mais cette dernière remarque n'est pas discriminatoire par rapport au caractère supposé hétérogène des eaux du socle (cf. IV-2-3-2) et aux faibles transports latéraux caractérisant la nappe. A Fada Tokobinkani Zarma, il existe un petit niveau de sables inférieurs (2 m d'épaisseur) qui pourrait parasiter la relation avec le socle.

### **IV-3 PIEZOMETRIE DES NAPPES PROFONDES**

Les quelques données présentes sur les niveaux piézométriques des nappes profondes de cette zone ne permettent pas d'établir les cartes des hydroisohypses. A titre indicatif, les valeurs ponctuelles des niveaux piézométriques seront fournies (fig IV-2).

Les deux seules valeurs sur le socle fournissent des niveaux de 186 et 188 m. Ces valeurs sont un peu plus basses que celles proposées dans le nord-est, comprises entre 192 et 195 m (cf. IV-2-3-2). Ces niveaux sont proches de ceux de la nappe phréatique.

Sur les quatre points où les niveaux piézométriques des oolithes ont pu être repérés, on observe une tendance à la décroissance vers le sud. Les valeurs sont proches de celles relevées dans les puits. Ceci est normal pour les forages de Yete Kouara et Wari puisqu'ils font partie de la zone où la nappe phréatique serait contenue dans le niveau oolithique (cf. IV-2-3-3). Toutefois sur les sites où les deux aquifères sont distincts (Karey Bangou et Dey Teguy) les piézométries des deux nappes restent proches. Dans la région de Karey Bangou où les niveaux ont été établis à partir d'ouvrages nivelés une différence piézométrique de 3 m seulement distinguerait les deux formations.

Les données piézométriques sur les sables inférieurs sont un peu plus nombreuses. Outre les niveaux relevés à Samari et Deli Tondi Atou Kouara, une tendance à l'écoulement vers le sud-est est repérable. Dans la région englobant les sites de Gounou Bangou, Dare Gourou et Zori Bangou, les niveaux piézométriques sembleraient passer brutalement de 210 m à 200 m. Cette remarque pourrait militer en faveur de la discontinuité de l'aquifère des sables inférieurs évoquée au III-2-2-1. Mais le forage de Sefo qui se situe à l'ouest de la rupture de pente présente un niveau piézométrique de 213 m qui laisse supposer qu'il est en continuité hydraulique avec les forages situés à l'est de la rupture de pente.

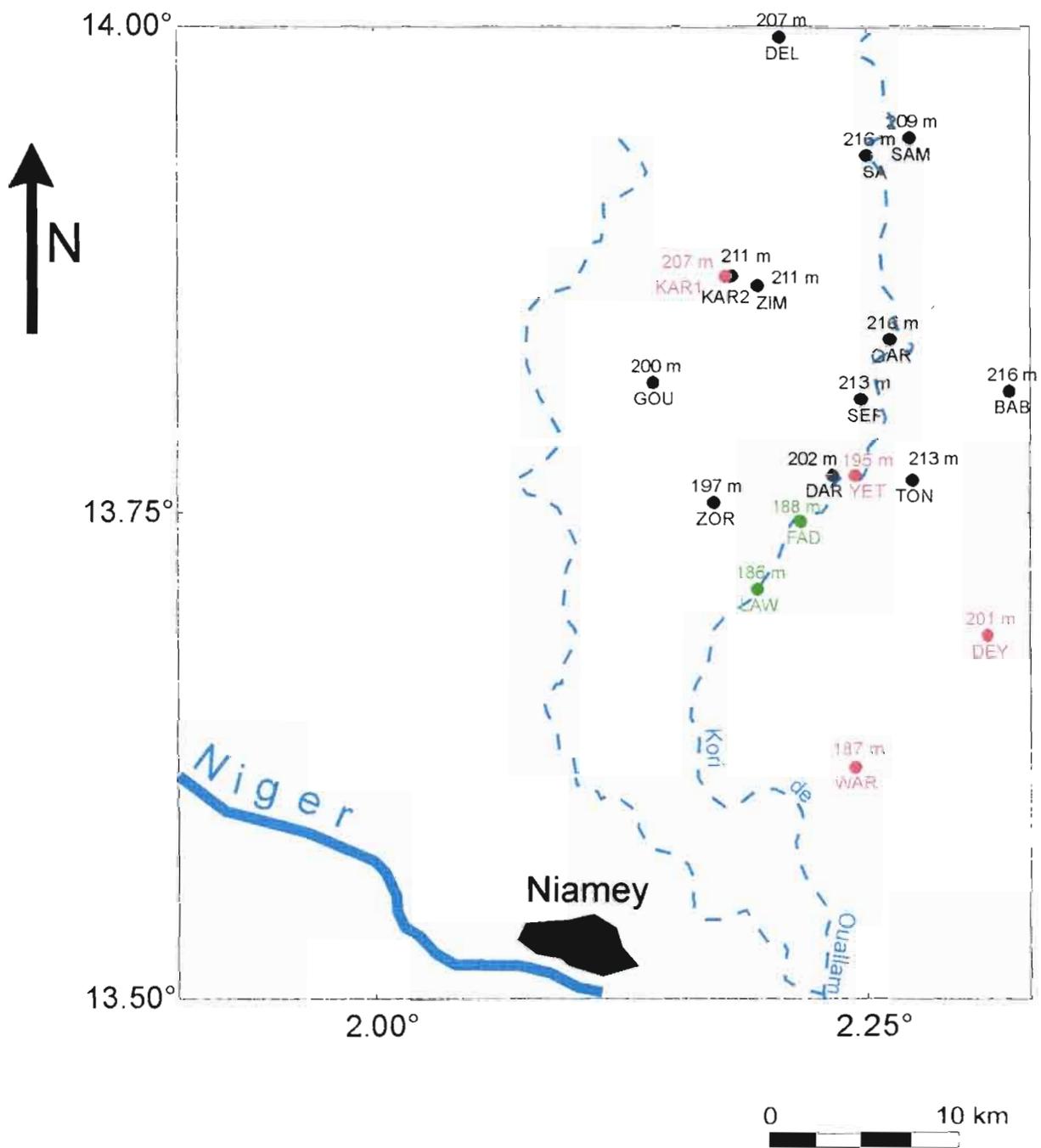


fig.IV-2 : Niveaux piézométriques des nappes profondes

- niveau piézométrique (m) ●
- Village ●
- aquifère des sables inférieurs
- aquifère des oolithes
- nappe du socle

Les niveaux piézométriques sont proches de ceux de la nappe phréatique dans le centre de la zone. Une connexion hydraulique entre les deux nappes pourrait exister, mais l'étude géologique a démontré que les deux formations étaient séparées par 12 m d'argile. De plus, sur le site de Gounou Bangou, les analyses chimiques et isotopiques n'ont pas permis à première vue de mettre en évidence une relation entre les deux nappes. Toutefois les sables inférieurs de Gounou Bangou présentent des eaux un peu moins minéralisées que sur le reste de la zone.

#### **IV-4 CONCLUSION**

Deux faits majeurs ressortent de l'analyse de la carte piézométrique des niveaux relevés dans les puits :

-La dépression brutale de la partie nord-ouest de la zone d'étude semble correspondre à une région où la nappe phréatique est peu ou pas productive. La plupart des puits de cette zone capteraient la nappe du socle. Il est à noter que les quelques analyses chimiques et isotopiques faites sur cette zone n'ont pas démontré un caractère particulier des eaux du socle sauf sur certains puits une tendance à de fortes minéralisations.

-La dépression piézométrique sud semblerait se superposer à la zone où la nappe phréatique est supposée en contact avec le niveau oolithique. En fait, les niveaux piézométriques proches du sommet des oolithes laissent plutôt penser que la nappe du CT3 aurait comme roche réservoir l'aquifère des oolithes.

La dépression locale de Kokiré est difficile à expliquer. Les hypothèses proposées, comme celle d'une nappe en creux localisée manquent d'arguments précis. En revanche la solution d'une relation entre le socle et la nappe phréatique pourrait être approfondie.

Les données sur les niveaux piézométriques des nappes profondes sont peu nombreuses. Les principales remarques à retenir sont :

-Dans la région de Fada Tokobinkani Zarma et de Lawey les niveaux piézométriques du socle semblent proches de ceux de la nappe phréatique.

-La connexion entre la nappe phréatique et l'aquifère des oolithes semble se confirmer.

-Dans la région de Gounou Bangou, Dare Gourou et Zori Bangou la nappe des sables inférieurs présenterait des niveaux piézométriques semblables à ceux du système phréatique suggérant une connexion hydraulique. Cependant les arguments chimiques et géologiques ne confirment pas cette hypothèse.

Les points du groupe 3 ne semblent pas se déconnecter hydrauliquement de la nappe du CT3, ce qui confirme leur appartenance au système phréatique et qui exclut l'hypothèse d'eaux en provenance de nappes perchées.

Il en est de même pour le puits de Fada Tokobinkani Zarma malgré ces teneurs isotopiques fortement négatives. En outre, sur ce site le niveau piézométrique du socle est proche de celui de la nappe phréatique. Si les deux aquifères sont en continuité hydrodynamique, une relation entre ces nappes est possible. Toutefois, elles sont séparées par 26 m de formation argileuse via un niveau de 2 m de sables inférieurs proches du socle. Cependant la formation argileuse séparant la nappe phréatique des sables inférieurs est décrite comme argiles silteuses et pourrait avoir un caractère semi-perméable laissant plausible un échange avec les nappes profondes.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A l'issue de ce mémoire, le bilan des études chimiques, géologiques et hydrodynamiques permet de proposer un schéma global du système aquifère du Continental Terminal dans le nord-ouest du degré carré de Niamey. Cette étude a d'abord permis de déterminer l'extension géométrique des différentes nappes. Les caractéristiques hydrochimiques de chacune d'entre elles ont été établies. Enfin la synthèse des résultats précédents adjointe aux considérations hydrodynamiques permet de proposer un modèle des relations entre les différents aquifères du Continental Terminal ainsi que les relations de ce système avec la nappe du socle sous-jacent.

### Caractéristiques chimiques

L'étude a permis de déterminer les caractéristiques chimiques de l'aquifère des sables inférieurs et de la nappe phréatique dans cette région et de donner de manière moins précise une idée du chimisme des nappes des oolithes et du socle.

La nappe phréatique se caractérise par une faible minéralisation, un faciès bicarbonaté calcique à nitraté sodique et des états de sous-saturation vis à vis de la plupart des minéraux. Les teneurs isotopiques sont négatives et à peu près comparables aux eaux des pluies actuelles.

Les eaux des sables inférieurs sont nettement plus minéralisées ; elles présentent un faciès bicarbonaté et sulfaté calco-sodique à sodique et des états saturés à légèrement sous-saturés vis à vis des minéraux carbonatés et sous-saturés vis à vis du gypse. Les teneurs isotopiques de cet aquifère sont nettement plus appauvries que celles de la nappe phréatique.

Le peu de données disponibles laissent paraître que les eaux de l'aquifère des oolithes présentent des caractéristiques proches de celles des sables inférieurs. Les eaux du socle se distinguent par une hétérogénéité certaine, consécutive au caractère fracturé de ce réservoir.

### Extension des aquifères

L'étude de l'extension des aquifères a permis de définir leurs limites, notamment dans la partie ouest où la question des relations entre les nappes par biseautage des séries argileuses avait été soulevée. De façon concise, les principaux résultats sont :

- Le système phréatique est repéré sur toute la zone d'étude excepté dans la partie nord-ouest où ses qualités aquifères seraient médiocres et obligeraient à approfondir la plupart des puits jusqu'au socle.
- La formation oolithique aquifère se localiserait essentiellement à l'est de l'affluent du kori de Ouallam. Elle serait totalement absente dans la partie nord est de la zone d'étude.
- Mis à part quelques lacunes locales, l'aquifère des sables inférieurs s'étendrait sur toute la région située à l'est de l'affluent du kori de Ouallam.
- Le socle, réservoir fracturé, n'aurait pas un caractère aquifère sur toute son étendue mais seulement sur les zones à forte densité de fractures.

Les limites ouest des aquifères des oolithes et des sables inférieurs sont définies de façon approximative. Il n'a pas été possible de préciser si l'une des formations aquifères s'étend au-delà de l'autre.

## Relations entre les différents aquifères

S'appuyant sur des arguments chimiques, géologiques et hydrodynamiques, il est possible de proposer un schéma des relations entre les différentes nappes présentes dans la zone d'étude. Ce modèle ne prétend en aucun cas être définitif. Il est basé sur de nombreuses hypothèses qu'il serait nécessaire de valider par des études complémentaires.

Les seuls critères géologiques permettent d'affirmer que l'aquifère des sables inférieurs serait directement en contact avec la nappe du socle à l'ouest du kori de Ouallam. Par contre, il ne semble pas y avoir de relations évidentes entre la formation oolithique et l'aquifère des sables inférieurs (fig. V-1).

En revanche, la nappe phréatique se connecterait à celle des oolithes dans une région située dans la partie sud de la zone d'étude et définie grossièrement par les latitudes 13,50 et 13,85°N et les longitudes 2,10 et de 2,30°E. Des effets de mélange d'eau seraient repérables sur les bordures de cette zone. L'apport des eaux en provenance des oolithes à l'intérieur de la zone serait freiné par les faibles transferts latéraux et serait rapidement dilué par l'apport de la recharge actuelle, ce qui ne permettrait pas de repérer de mélange par les méthodes chimiques sur un réseau de prélèvements au maillage trop lâche (fig. V-2).

### Les eaux du groupe 3

L'hétérogénéité des paramètres chimiques, la dispersion spatiale de ces points, leurs situations géomorphologiques et géologiques distinctes laissent penser que les causes de ces fortes minéralisations sont particulières à chaque site.

Ces échantillons semblent faire partie de la nappe phréatique. Hormis Fada Tokobinkani Zarma, ces eaux ont un faciès isotopique similaire à l'aquifère du CT3. De plus, les niveaux statiques relevés dans les puits ne semblent pas se déconnecter de la piézométrie de la nappe phréatique. Ainsi l'hypothèse d'appartenance à des nappes perchées est peu probable.

L'environnement rural et la situation économique de pays en voie de développement excluent une influence de la pollution industrielle et agricole sur la minéralisation. En outre, mise à part à Diolé Goubé Kouara, ces échantillons ne présentent pas un chimisme d'eau polluée. Pour le puits de Diolé Goubé Kouara, la position pastorale, le faciès anormal à forte teneur en chlorure et en nitrate suggèreraient une contamination des eaux par les déjections des troupeaux.

Seuls les points de Fada Tokobinkani Zarma et de Moussa Diolo pourraient correspondre à des mélanges entre aquifères. A Moussa Diolo, seule la position sur les limites des aquifères et le faciès chimique proche des aquifères profonds laissent supposer une relation entre la nappe phréatique et les sables inférieurs. Toutefois le faciès isotopique ne se distingue pas de celui de la nappe du CT3 et les proportions de mélange calculées à partir du chlorure et de l'oxygène-18 et ne donnent pas des résultats concordants : respectivement 33% et 7% de participation des sables inférieurs. Ces valeurs ont été calculées avec les médianes des aquifères du CT3 et des sables inférieurs. Cependant la grande variabilité des concentrations ioniques et des teneurs isotopiques de la nappe phréatique pourrait être responsable de l'écart entre les coefficients de proportionnalité. Pour preuve supplémentaire, le coefficient calculé à partir des teneurs en  $^2\text{H}$  est négatif. Le point de Diolé Goubé Kouara est dans la même situation géologique que Moussa Diolo mais l'hypothèse d'une pollution semble plus probable.

Pour Fada Tokobinkani Zarma, les critères géologiques, isotopiques et hydrodynamiques convergent. Il y aurait des échanges ascendants du socle vers la nappe phréatique à travers une formation semi-perméable via un faible niveau de sables inférieurs. La forte minéralisation (plus

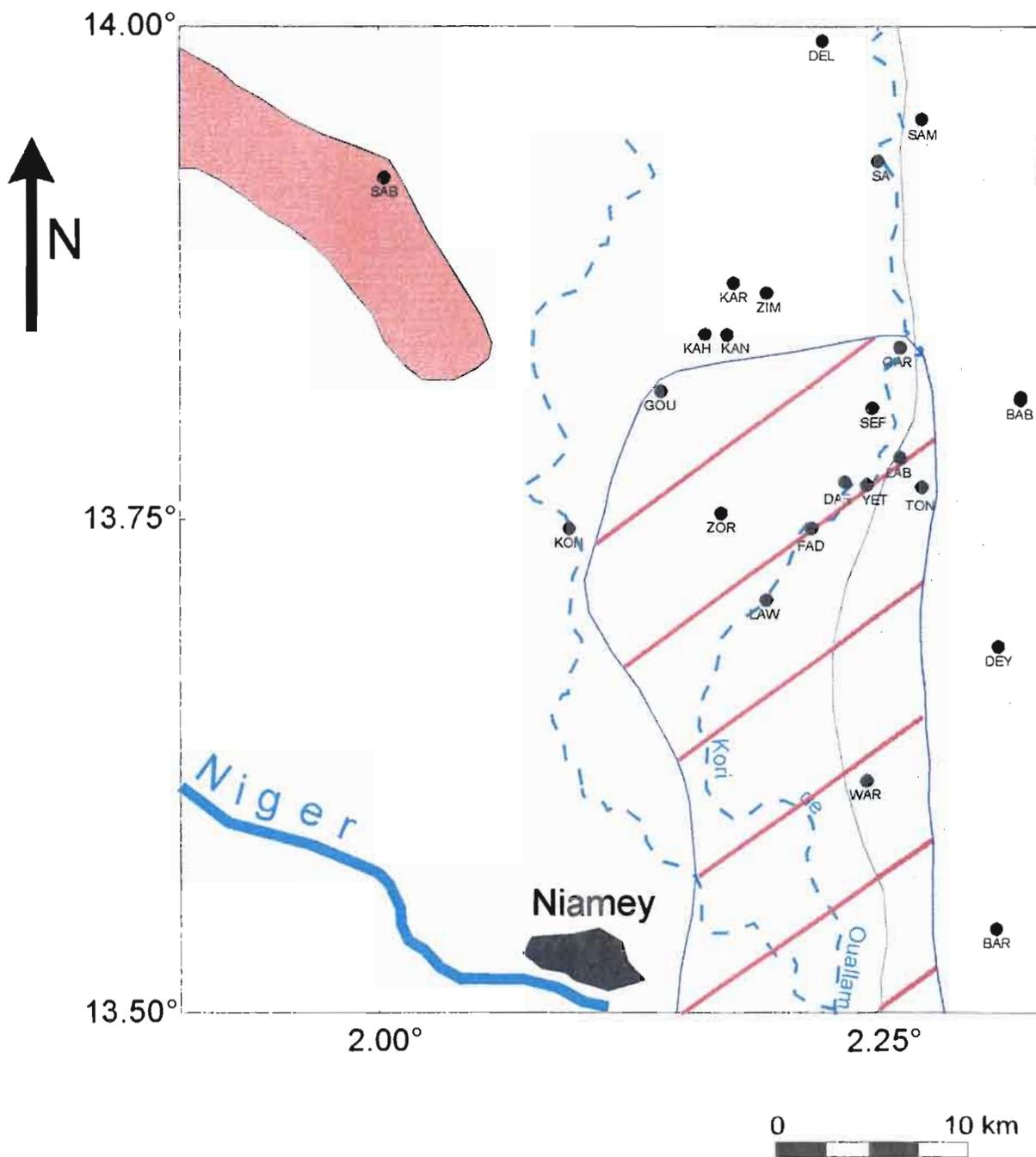


fig. V-1 : Relation entre les différentes nappes

- contact entre le socle et l'aquifère des sables inférieurs
- connexion de la nappe phréatique à l'aquifère des oolithes
- système phréatique non productif

du double de celle des aquifères profonds) pourrait s'expliquer par des phénomènes d'évaporation. Cette dernière hypothèse reste toutefois à vérifier .

Les fortes teneurs des puits de Gata Kouara Tegui et de Libo Atou Kouara pourraient s'expliquer par des dissolutions de minéraux évaporitiques contenus localement dans la matrice de l'aquifère. Ces eaux ont en effet un faciès sulfaté-calcique et sont en équilibre avec la calcite, la dolomite et le gypse. Une augmentation de la minéralisation par évaporation pourrait se surimposer au phénomène mais n'expliquerait pas à elle seule la multiplication des conductivités par cinq observée sur ces puits. La même remarque peut être faite à propos de Fada Tokobinkani Zarma où ces phénomènes empêchent l'estimation des proportions de mélange.

### Perspectives

Dans la continuité des travaux sur l'hydrochimie des aquifères, il serait nécessaire d'établir une étude complète des caractéristiques chimiques et isotopiques de la nappe des oolithes à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'étude. Ceci permettrait de mieux définir le pôle chimique de cet aquifère afin de repérer d'éventuelles relations entre les oolithes et les sables inférieurs.

Pour préciser la relation entre la nappe phréatique et les oolithes, il serait nécessaire d'effectuer des prélèvements sur les bordures de la zone de connexion afin de confirmer l'hypothèse de mélange entre les eaux des deux aquifères. Entre autres, des analyses de carbone 14 pourraient soutenir l'hypothèse par un meilleur traçage de la relation.

Toujours dans la même optique, des levés piézométriques sur un réseau de puits plus dense confirmeraient la connexion, en précisant le caractère continu de la surface piézométrique.

Pour confirmer les différentes hypothèses émises à propos des puits à forte minéralisation, des études détaillées devraient être mise en oeuvre sur chacun d'eux : en particulier suivis chimiques, analyses minéralogiques des épontes des aquifères, modélisation de dissolution de minéraux ou d'évaporation...

Enfin, dans l'étude hydrodynamique, l'évolution piézométrique dans le temps devrait être abordée. L'étude des variations saisonnières et de l'évolution à long terme pourrait fournir des informations supplémentaires sur le système phréatique.

Par exemple, l'étude des variations saisonnières pourrait donner une idée globale de la distribution des perméabilités dans la nappe et, par là même, mettre en évidence des changements de la nature de l'aquifère, notamment le passage de la nappe phréatique à l'aquifère des oolithes. En effet, en dehors d'une recharge particulièrement forte, le fait qu'un point proche d'une zone d'infiltration montre des variations saisonnières importantes peut signifier une mauvaise transmissivité locale de la nappe.

En outre, l'étude de l'évolution piézométrique à long terme sur l'ensemble du degré carré a montré une augmentation générale de la surface piézométrique de la nappe du CT3 sur les dix dernières années. Or dans notre zone, cette évolution est moins évidente. Quelques points confirment la tendance, d'autres stagnent pendant que certains sites présentent des baisses. L'étude de ces phénomènes pourrait nous donner une idée des hétérogénéités de la nappe phréatique ou bien nous permettre de préciser son extension, les points aberrants pouvant être considérés comme des points avec des conditions aux limites particulières.

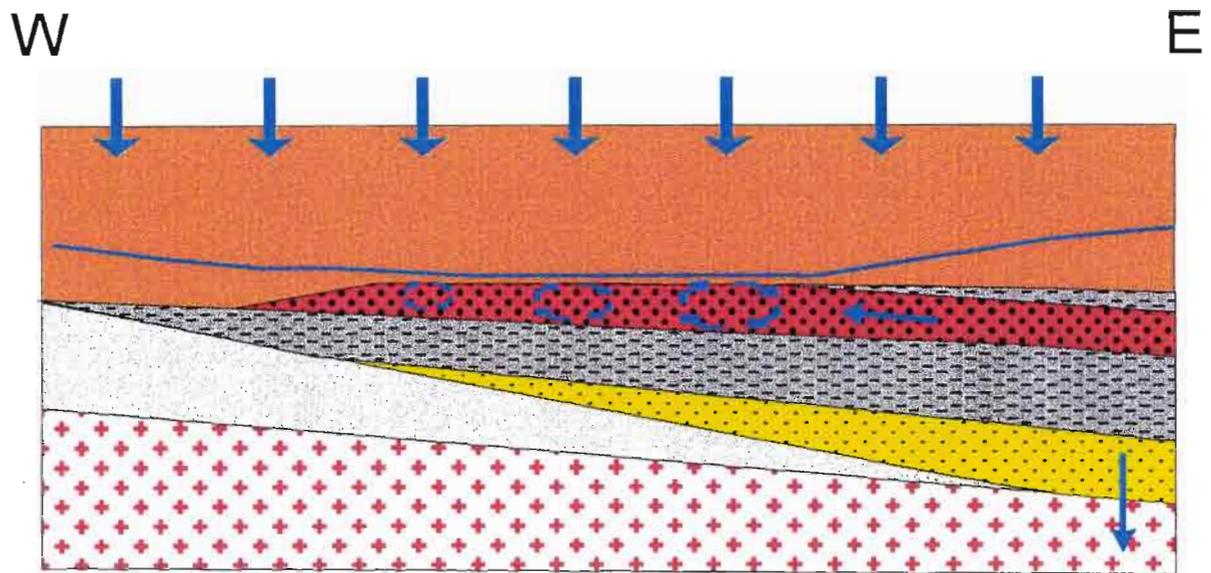


fig. V-2 : Coupe schématique

- |   |  |   |                          |
|---|--|---|--------------------------|
|  | formation du CT3                             |  | argiles grises à lignite |
|  | oolithes aquifères                           |  | sables inférieurs        |
|  | socle  |  | altérites                |
|  | surface piézométrique de la nappe phréatique |   |                          |
|  | flux d'eau                                   |   |                          |
|  | mélange                                      |   |                          |



## BIBLIOGRAPHIE

- ABDOULKARIMOU T. (1988) : Détermination géologique des réservoirs du Continental Terminal à l'ouest du Dallol Bosso (Niger). DEA, Bordeaux III, 52 p.
- ALLISON G.B., BARNES C.J. et HUGHES M.W. (1982) : The distribution of Deuterium and <sup>18</sup>O in dry soils 2. Experimental. *Journal of Hydrology*, 64, 377-397.
- ARANYOSSI J.F., GUERRE A. et SIDORO M. (1989) : Etude des dépressions piézométriques par les isotopes de l'environnement ; premières données sur des exemples au Mali. *Proceeding of the Sahel Forum "The state of the art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa"* Ouagadougou, UNESCO/IWRA, 660-670.
- BARNES C.J., JACOBSON G. et SMITH G.D. (1992) : The origin of high-nitrate ground waters in the Australian arid zone. *Journal of Hydrology*, 137, 181-197.
- BOUDOURESQUE L., DUBOIS D., LANG J. et TRICHET J. (1982) : Contribution à la stratigraphie et à la paléogéographie de la bordure occidentale du bassin des Iullemeden au Crétacé supérieur et au Cénozoïque (Niger et Mali, Afrique de l'Ouest). *Bull. Soc. géol. France*, t. XXIV, n°4, 685-695.
- COURAULT D., D'HERBES J.M. et VALENTIN C. (1990) : Le bassin versant de Sama Dey, Premières observations pédologiques et phyto-écologiques. Rapport multigraphié, ORSTOM 37 p.
- DEHAYS H. (1986) : Etudes géophysiques par prospection électrique ; Programme d'hydraulique villageoise dans le département de Niamey (Niger). Rapport BRGM, 14 p.
- DESCONNETS J.C., TAUPIN J.D. et LEBEL T. (1993) : Le rôle des mares dans le bilan hydrologique d'une région sahéenne. In Bolle H.J., Feddes R.A. and Kalma J. (editors) : *Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales (proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993)*. IAHS publ. n° 212, 299-311.
- DESCONNETS J.C. ( 1994) : Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréique en milieu sahéenne (Niger-Degré Carré de Niamey). Thèse Montpellier II, 326 p+annexe.
- DESCONNETS J.C., GALLE S., LEDUC C. et PEUGEOT C. ( 1996) : Les processus de redistribution des eaux en région sahéenne : l'hydrologie dans l'expérience Hapex-Sahel. In *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*. IAHS Publ. n°238, 125-137.
- DUBOIS D. et LANG J. (1981) : Etude lithostratigraphique et géomorphologique du Continental Terminal et du Cénozoïque inférieur dans le bassin des Iullemeden (Niger) : Extrait du bulletin de l'Institut Fondamental d'Afrique Noire, Tome 43, série A, n°1-2, janvier-avril 1981. Paru le 30 juin 1984, 40 p.

- FONTES J.C (1976) : Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse de doctorat d'état, Paris VI, 208 p.
- FRITZ B. et FONTES J.C. (1980) : Introduction In Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, The Terrestrial Environment, Fritz et Fontes Eds., Elsevier Publ. Co. (Amsterdam), vol. 1, 1-19.
- GASSE F., TEHET R., DURAND A. GIBERT E. et FONTES J.C. (1990) : The arid-humid transition in the Sahara and the Sahel during the last deglaciation. from Nature, vol. 346, n° 6280, 141-146.
- GREIGERT J. (1966) : Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale). Publication n°2 , Direction des Mines et de la Géologie (Niger) et document BRGM, 153-199.
- GREIGERT J. (1978) : Les nappes du Continental Terminal du Synclinal de Dogondoutchi. Atlas des eaux souterraines du Niger (Tome 1-Fascicule V). Rapport BRGM/ Ministère des mines et de l'hydraulique de la république du Niger, réf.79AGE.001, BRGM édit. , 81-102.
- GREIGERT J. et POUUNET R. (1967) : Essai de description des formations géologiques de la République du Niger. Rapport BRGM/Direction des Mines et de la Géologie (Niger), Publication n°3, 67-70 et 158-164.
- LEDUC C., TAUPIN J.D. et LE GAL LA SALLE C. (1996) : Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 323, série Ila, 599-605.
- LEDUC C., BROMLEY J. et SCHROETER P. (1997) : Water table fluctuation and recharge in semi-arid climat : some results of the Hapex-Sahel hydrodynamic survey (Niger). Journal of Hydrology, volume 188-189 (1-4), 123-138 .
- LEDUC C. et LOIREAU M. (1997) : Fluctuation piézométrique et évolution du couvert végétal en zone sahéenne (sud ouest du Niger). In "Sustainability of Water Ressources under Increasing Uncertainly", IAHS Publ n° 240, 192-200.
- LEDUC C. et TAUPIN J.D. (1997) : Hydrochimie et recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey,Niger). In "Hydrochemistry", IAHS publ. n°244, 235-243.
- LE GAL LA SALLE C. (1990) : Etude des précipitations nigériennes. DEA Paris XI, 56 p.+annexe.
- LE GAL LA SALLE C. (1994) : Circulation des eaux souterraines dans l'aquifère captif du Continental Terminal - Bassin des Iullemeden, Niger - Méthodologie et application : isotopes stables de la molécule d'eau, carbone-14, chlore-36, uranium et gaz nobles. Thèse Paris XI, 173 p.+annexe.
- L'HOTE Y. et MAHE G. (1996) : Afrique de l'Ouest et Centrale, précipitations moyennes et annuelles (période 1951-1989), ORSTOM.

- MONFORT M. (1996) : Reconstitution géologique des aquifères du Continental Terminal dans la région de Niamey. Mémoire de Maîtrise, Université Montpellier II, 51 p.+ annexe.
- MACHENS E. (1973) : Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'ouest de la République du Niger. Publication n°4 , Direction des Mines et de la Géologie (Niger) et document BRGM, 96-104.
- NDIAYE B., ARANYOSSY J.F. et FAYE A. (1993) : Le rôle de l'évaporation dans la formation des dépressions piézométriques en Afrique Sahélienne : hypothèse et modélisation. IAEA-TECDOC-721, Les ressources en eau au Sahel, comptes rendus des études effectuées dans le cadre du projet RAF/8/012 : hydrologie isotopique dans les pays du sahel, 53-63.
- PNUD (1990) : Atlas des ressources en eaux souterraines du Continental Terminal, Projet PNUD/DCTD, Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement, Direction des Ressources en Eau, République du Niger, 42 p.
- TEHET R., GASSE F., DURAND A. SCHROETER P. et FONTES J.C. (1990) : Fluctuations climatiques du Tardiglaciaire à l'Actuel au Sahel (Bougdouma, Niger Méridional). C.R. Acad. Sci. Paris, t.311, Série II, 253-258.
- TAUPIN J.D. (1990) : Evaluation isotopique de l'évaporation en zone non saturée sous climat sahélien et évolution géochimique des solutions du sol (Vallée du Moyen Niger). Thèse, université de Paris Sud, 172 p+annexe.
- TAUPIN J.D., LEBEL T., CASENAVE F., CHIRON F., GATHELIER R., GREARD M., GUALDE R., KONG J. et VALERO T. (1992) : EPSAT-Niger, campagne 1991. Rapport ORSTOM/DMN, 86 p.
- TAUPIN J.D. (1996) : Utilisation des méthodes isotopiques dans l'étude de différentes parties du cycle de l'eau dans le cadre d'Hapex-Sahel. Interactions surface continentale/atmosphère : L'expérience Hapex-Sahel. Actes des X<sup>e</sup> Journées Hydrologiques-Orstom (1994), 335-350.
- TAUPIN J.D., LAROCHE C. et ROBIN J. (1996) : EPSAT-Niger suivi à long terme, campagne 1995. Rapport ORSTOM/DMN, 59p.
- TAUPIN J.D., GALLAIRE R. et ARNAUD Y. (1997) : Analyses isotopiques et chimiques des précipitations sahéliennes de la région de Niamey au Niger : implications climatologiques. In "Hydrochemistry" IAHS publ. n°244, 151-162.



# **ANNEXE I**



Nom du puits	Longitude (est)	Latitude (nord)	Référence de l'échantillon	Référence de l'analyse	Conductivité de terrain	Conductivité de laboratoire	pH de terrain	pH estimé *	pH de laboratoire	Température de terrain	Température estimée **
					μS.cm <sup>-1</sup>		°C				
BABAKAINAK VILL	2°19.20	13°48.76	AVI08	N1	70	-	6,6	-	-	31,9	-
BANEY KAINA	2°01.54	13°58.60	NOV18	-	110	-	5,7	-	-	-	28,8
BANGOUA	1°59.75	13°36.38	SEP02	N2	214	215	6,7	-	7,2	-	29,0
BARKIAWEL BERI	2°18.67	13°32.73	AVG01	N3	81	-	6,1	-	-	26,7	-
BARKIAWEL KAINA	2°10.88	13°41.53	96FA	N4	343	-	6,4	-	6,5	29,7	-
BARKIAWEL VILLA	2°18.67	13°32.73	SEP06	N5	87	111	5,5	-	-	-	26,7
BARKIRE ALIDOU	2°05.76	13°37.31	96ED	N6	118	-	5,8	-	6,6	25,4	-
BOYEY TONDI CLO	2°14.49	13°53.90	DEC30	N7	236	262	6,5	-	6,9	-	30,2
DANGUEY GOROU	2°00.53	13°47.66	96DC	N8	34	-	5,7	-	6,4	28,0	-
DELI TONDI	2°12.23	13°59.67	96GG	-	174	-	-	-	6,3	-	-
DEY TEGUI	2°18.68	13°41.10	AVI04	N9	293	-	6,3	-	-	28,4	-
GADABO	2°17.90	13°46.34	AVI06	N10	306	-	6,5	-	-	29,9	-
GADABO FETOKADI	2°19.58	13°46.34	AVI07	N11	267	-	6,5	-	-	30,1	-
GARDAMA K. B11	2°15.80	13°50.08	96FG	N12	477	-	5,9	-	6,9	28,1	-
GOUNOU BANGO F1	2°08.56	13°48.90	96GE	N13	223	-	4,9	-	6,4	-	29,6
GOUNOU BANGOU	2°08.57	13°48.93	96EA	N14	295	-	5,4	-	6,5	29,6	-
KAREY BANGOU FE	2°10.64	13°53.17	AVK07	N15	291	-	6,6	-	-	29,5	29,5
KOGOROU	2°14.96	13°32.30	96CA	-	212	-	-	6,3	6,6	-	29,0
KOGOROU	2°14.96	13°32.30	96AG	N16	144	-	6,0	-	6,5	-	-
KOKIRE	2°12.50	13°42.19	96FC	N17	200	-	5,9	-	6,5	29,5	-
KONE KAINA ECOL	2°05.93	13°41.90	96EE	N18	196	-	5,6	-	6,4	24,0	-
KONE KAINA ECOL	2°05.93	13°41.90	JAN06	N19	186	197	5,2	-	5,6	-	26,5
KONE KAINA FOR	2°06.00	13°42.00	FOR05	N20	200	189	5,2	-	6,6	-	29,0
LAWEY	2°11.69	13°42.72	NOV21	-	185	-	6,1	-	-	-	28,2
LOBOTONDI FED	2°00.04	13°57.33	96DB	N21	134	-	5,9	-	6,6	28,0	-
NIABERI KOUARA	2°00.72	13°59.48	96DA	N22	357	-	5,4	-	6,3	29,2	-
OURA TONDI CHLO	2°19.79	13°54.92	DEC27	N23	435	451	6,0	-	6,5	-	31,6
OURA TONDI CHLO	2°19.79	13°54.92	AVK13	N24	501	-	6,2	-	-	31,6	-
POSTE POLICE	2°10.63	13°31.69	JAN08	N25	118	120	6,3	-	6,0	-	29,0
POSTE POLICE	2°10.63	13°31.69	SEP18	N26	53	60	6,2	-	6,5	-	29,0
SAMARI ECOLE	2°15.95	13°56.74	DEC29	N27	294	191	6,6	-	8,3	-	24,5

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique et du groupe 3 et localisation des points de prélèvements

Nom du puits	Longitude (est)	Latitude (nord)	Référence de l'échantillon		Conductivité	Conductivité	pH	pH	pH de	Température	Température
					de terrain	de laboratoire	de terrain	estimé *	laboratoire	de terrain	estimée **
					$\mu\text{S.cm}^{-1}$					$^{\circ}\text{C}$	
SAMARI KAINA FO	2°13.67	13°57.91	FOR04	N28	340	313	5,0	-	6,4	30,2	-
SAMARI KAINA FO	2°13.67	13°57.91	JAN09	N29	340	310	5,0	-	5,5	-	30,2
SAMARI MOSQUEE	2°16.16	13°56.68	DEC28	N30	194	188	6,6	-	7,0	-	28,8
SAMARI MOSQUEE	2°16.16	13°56.68	95-61	-	129	-	6,5	-	-	29,8	-
SISAN TONDI ENC	2°09.66	13°54.77	AVK05	N31	91	-	6,4	-	-	28,5	-
SISAN TONDI K.T	2°09.97	13°55.32	96EB	N32	94	-	-	6,5	6,6	-	24,5
TERA BOYEY TOND	1°58.84	13°52.17	96DF	N33	56	-	5,8	-	6,7	29,4	-
WARI ECOLE	2°14.38	13°36.92	AVI02	N34	145	-	7,0	-	-	30,0	-
WARI PASTORAL	2°14.65	13°37.35	AVI03	N35	106	-	6,5	-	-	29,3	-
WARI PASTORAL	2°14.65	13°37.35	JAN14	-	115	-	6,3	-	-	-	29,3
ZEIBANE FITI KO	2°00.94	13°45.52	96DG	N36	116	-	5,5	-	6,4	26,8	-
ZIMBA	2°11.84	13°52.08	DEC31	N37	196	180	6,4	-	6,8	-	31,1
Médiane					194		6,2		6,5	29,3	29,2
Maximum					34		4,9		5,5	24,0	24,5
Minimum					501		7,0		8,3	31,9	31,6
DIOLE GOUBE KOU	2°04.51	13°51.82	96DE	A1	985	-	6,9	-	6,6	29,8	-
FADA TOKOBIN Z1	2°12.94	13°44.85	NOV22	-	6780	-	7,1	-	-	-	-
FADA TOKOBIN Z3	2°12.96	13°44.88	NOV23	-	2500	-	5,6	-	-	-	-
FADA TOKOBIN. Z	2°12.94	13°44.85	96FF	A2	2230	-	7,1	-	7,7	28,5	-
GATA KOUARA T	2°01.03	13°56.64	96DD	A3	2680	-	6,8	-	8,1	29,6	-
GOUBE MENASARA	2°05.15	13°51.52	NOV16	-	715	-	6,5	-	-	-	31,1
LIBO ATOU BABA	2°15.02	13°53.69	FEV11	A4	2520	2780	-	6,9	6,5	-	28,2
LIBO ATOU KOUAR	2°15.00	13°54.00	96FE	A5	4030	3740	6,4	-	7,4	27,3	-
MOUSSA DIOLO	2°05.98	13°47.32	96EC	A6	1406	-	5,3	-	6,7	28,4	-
NIABERI KOUARA	2°00.72	13°59.48	NOV19	-	810	-	5,3	-	-	-	29,7

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique et du groupe 3 et localisation des points de prélèvements (suite)

\* pH relevé lors de campagnes de mesures précédentes du programme hapex-Sahel

\*\* Température relevée lors de campagnes de mesures précédentes

Les températures estimées à 29,0°C sont estimées par la valeur médiane de la de la température dans la zone d'étude arrondie au degré Celsius près

Nom du puits	Référence de l'échantillon	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq.l <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> de terrain	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Balance ionique
BABAKAINAK VILL	AVI08	0,280	0,114	0,620	0,000	0,440	0,800	0,050	0,040	0,610	-3,03
BANEY KAINA	NOV18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BANGOULA	SEP02	1,166	0,499	0,476	0,039	1,765	-	0,090	0,227	0,096	0,05
BARKIAWEL BERI	AVG01	0,300	0,155	0,110	0,100	0,170	0,161	0,113	0,000	0,339	3,34
BARKIAWEL KAINA	96FA	0,730	0,240	2,060	0,030	0,560	-	0,290	1,090	1,050	1,16
BARKIAWEL VILLA	SEP06	0,340	0,144	0,101	0,148	0,165	-	0,138	0,014	0,451	-2,33
BARKIRE ALIDOU	96ED	0,440	0,270	0,330	0,010	0,910	-	0,090	0,030	0,090	-3,23
BOYEU TONDI CLO	DEC30	0,700	0,421	0,836	0,075	0,310	0,239	0,214	0,070	1,409	0,72
DANGUEY GOROU	96DC	0,130	0,030	0,090	0,060	0,370	-	0,050	0,020	0,010	-18,40
DELI TONDI	96GG	0,400	0,170	0,810	0,050	0,320	-	0,140	0,100	0,890	-0,69
DEY TEGUI	AVI04	0,720	0,403	1,074	0,221	0,230	0,320	0,714	-	1,623	-2,99
GADABO	AVI06	0,570	0,211	1,800	0,081	0,440	0,480	0,520	-	1,558	2,78
GADABO FETOKADI	AVI07	0,500	0,240	1,400	0,076	0,200	0,200	0,360	-	2,100	-9,11
GARDAMA K. B11	96FG	1,540	0,670	1,050	0,840	0,640	-	0,370	0,750	2,400	-0,73
GOUNOU BANGO F1	96GE	0,830	0,430	0,740	0,050	0,270	-	0,160	0,120	1,580	-1,91
GOUNOU BANGOU	96EA	0,960	0,470	0,560	0,110	0,380	-	0,200	0,060	1,530	-1,64
KAREY BANGOU FE	AVK07	1,053	0,532	0,742	0,120	0,760	0,761	0,262	0,853	0,360	4,53
KOGOROU	96CA	0,930	0,240	0,620	0,150	0,710	-	0,550	0,080	0,620	-0,51
KOGOROU	96AG	0,640	0,190	0,320	0,040	0,580	-	0,180	0,040	0,580	-7,39
KOKIRE	96FC	0,600	0,250	0,760	0,030	0,470	-	0,250	0,380	0,590	-1,50
KONE KAINA ECOL	96EE	0,440	0,100	1,000	0,080	0,430	-	0,080	0,030	1,140	-1,82
KONE KAINA ECOL	JAN06	0,380	0,333	0,848	0,103	0,180	-	0,127	0,021	0,959	12,78
KONE KAINA FOR	FOR05	0,314	0,146	0,954	0,120	0,060	-	0,168	0,104	1,192	0,33
LAWEY	NOV21	0,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LOBOTONDI FED	96DB	0,520	0,250	0,280	0,090	0,460	-	0,050	0,110	0,280	11,76
NIABERI KOUARA	96DA	1,110	0,670	0,590	0,450	0,160	-	0,650	0,100	1,960	-0,88
OURA TONDI CHLO	DEC27	0,815	0,383	2,539	0,044	0,150	0,161	0,067	0,045	3,244	3,77
OURA TONDI CHLO	AVK13	0,960	0,460	2,567	0,061	0,270	0,280	0,150	0,082	3,205	4,40
POSTE POLICE	JAN08	0,250	0,275	0,217	0,231	0,800	-	0,282	0,001	0,049	-7,51
POSTE POLICE	SEP18	0,127	0,045	0,165	0,121	0,280	-	0,129	0,026	0,013	1,10
SAMARI ECOLE	DEC29	0,740	0,134	1,460	0,102	1,010	1,280	0,340	0,179	0,794	2,37

Tableau 2 : Concentrations chimiques des eaux de la nappe phréatique et du groupe 3

Nom du puits	Référence de l'échantillon	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq.l <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> de terrain	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Balance ionique
SAMARI KAINA FO	FOR04	0,792	0,476	1,315	0,063	0,020	-	0,290	0,228	2,161	-0,99
SAMARI KAINA FO	JAN09	0,650	0,808	1,365	0,067	0,033	-	0,380	0,271	1,566	12,45
SAMARI MOSQUEE	DEC28	0,379	0,024	1,147	0,018	0,530	0,600	0,220	0,124	0,619	2,45
SAMARI MOSQUEE	95-61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SISAN TONDI ENC	AVK05	0,190	0,031	0,400	0,062	0,310	0,320	0,080	0,001	0,273	1,49
SISAN TONDI K.T	96EB	0,290	0,060	0,320	0,080	0,430	-	0,140	0,210	0,050	-5,06
TERA BOYEY TOND	96DF	0,230	0,050	0,150	0,060	0,450	-	0,030	0,020	0,090	-9,26
WARI ECOLE	AVI02	0,384	0,185	0,352	0,077	0,350	0,400	0,060	0,060	0,580	-2,54
WARI PASTORAL	AVI03	0,170	0,080	0,230	0,070	0,230	0,280	0,040	0,001	0,330	-4,35
WARI PASTORAL	JAN14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZEIBANE FITI KO	96DG	0,320	0,090	0,560	0,030	0,380	-	0,040	0,070	0,550	-1,96
ZIMBA	DEC31	0,564	0,241	0,543	0,063	0,370	0,361	0,127	0,057	0,853	0,14
Médiane		0,344	0,620	0,052	0,075	0,370		0,150	0,071	0,620	
Minimum		0,127	0,090	0,008	0,000	0,020		0,030	0,000	0,010	
Maximum		1,110	2,567	0,214	0,840	1,765		0,714	1,090	3,244	
DIOLE GOUBE KOU	96DE	1,520	0,990	0,850	3,630	2,240	-	2,000	0,920	1,920	-0,64
FADA TOKOBIN Z1	NOV22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FADA TOKOBIN Z3	NOV23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FADA TOKOBIN. Z	96FF	6,280	4,400	13,450	0,270	7,010	-	4,470	12,230	0,160	1,10
GATA KOUARA T	96DD	15,860	9,440	7,970	0,210	3,210	-	0,720	27,230	1,760	0,84
GOUBE MENASARA	NOV16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LIBO ATOU BABA	FEV11	18,400	6,917	8,130	1,205	3,852	-	2,127	19,792	6,040	4,27
LIBO ATOU KOUAR	96FE	35,930	8,910	5,460	1,380	3,270	-	1,990	33,780	5,990	6,88
MOUSSA DIOLO	96EC	5,170	3,290	5,720	0,080	0,510	-	1,260	9,460	2,750	0,99
NIABERI KOUARA	NOV19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 2 : Concentrations chimiques des eaux de la nappe phréatique et du groupe 3 (suite)

Nom du puits	Référence de l'échantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	TDS	TDS
						recalculée *
mg.l-1						
BABAKAINAK VILL	AVI08	16,45	-	-	108,4	106,0
BANEY KAINA	NOV18	-	-	-	0,00	0,00
BANGOULA	SEP02	18,49	-	-	0,0	188,0
BARKIAWEL BERI	AVG01	19,55	-	-	68,4	69,2
BARKIAWEL KAINA	96FA	9,47	0,01	-	0,0	237,4
BARKIAWEL VILLA	SEP06	24,34	-	-	0,0	84,6
BARKIRE ALIDOU	96ED	11,64	0,04	-	0,0	97,4
BOYEY TONDI CLO	DEC30	36,00	2,39	0,03	194,6	196,8
DANGUEY GOROU	96DC	6,86	0,03	-	0,0	40,2
DELI TONDI	96GG	7,26	0,06	-	0,0	122,4
DEY TEGUI	AVI04	18,55	-	-	221,9	211,1
GADABO	AVI06	21,44	-	-	221,9	221,8
GADABO FETOKADI	AVI07	19,03	-	-	222,3	222,2
GARDAMA K. B11	96FG	24,29	0,01	-	0,0	357,0
GOUNOU BANGO F1	96GE	7,34	0,01	-	0,0	173,9
GOUNOU BANGOU	96EA	7,28	0,04	-	0,0	177,3
KAREY BANGOU FE	AVK07	46,84	-	-	215,1	215,0
KOGOROU	96CA	10,48	0,00	-	0,0	157,2
KOGOROU	96AG	10,27	0,00	-	0,0	113,9
KOKIRE	96FC	10,26	0,01	-	0,0	136,3
KONE KAINA ECOL	96EE	6,66	0,00	-	0,0	144,0
KONE KAINA ECOL	JAN06	-	-	-	0,0	111,1
KONE KAINA FOR	FOR05	15,76	-	-	0,0	138,9
LAWEY	NOV21	-	-	-	0,0	0,0
LOBOTONDI FED	96DB	29,68	0,14	-	0,0	105,6
NIABERI KOUARA	96DA	10,01	0,03	-	0,0	230,5
OURA TONDI CHLO	DEC27	15,16	2,51	0,03	311,1	313,5
OURA TONDI CHLO	AVK13	15,10	-	-	325,8	325,7
POSTE POLICE	JAN08	-	-	-	0,0	84,2
POSTE POLICE	SEP18	10,44	-	-	0,0	45,8
SAMARI ECOLE	DEC29	18,84	3,09	0,03	204,4	207,4
SAMARI KAINA FO	FOR04	25,70	-	-	0,0	236,4
SAMARI KAINA FO	JAN09	-	-	-	0,0	182,3
SAMARI MOSQUEE	DEC28	20,40	1,24	0,03	139,9	141,1
SAMARI MOSQUEE	95-61	-	-	-	0,0	0,0
SISAN TONDI ENC	AVK05	31,11	-	-	85,6	85,6
SISAN TONDI K.T	96EB	7,91	0,01	-	0,0	69,3
TERA BOYEY TOND	96DF	14,32	0,07	-	0,0	60,4
WARI ECOLE	AVI02	19,32	0,04	-	102,7	102,7
WARI PASTORAL	AVI03	17,37	0,01	-	65,7	65,7
WARI PASTORAL	JAN14	-	-	-	0,0	0,0
ZEIBANE FITI KO	96DG	6,42	0,04	-	0,0	90,1
ZIMBA	DEC31	16,41	1,91	0,03	128,3	130,2
<b>Médiane**</b>		15,76	0,04	-	194,6	138,9
<b>Minimum</b>		6,42	0,01	-	65,7	40,2
<b>Maximum</b>		46,84	3,09	-	325,8	357,0
DIOLE GOUBE KOU	96DE	14,35	0,03	-	0,0	588,6
FADA TOKOBIN Z1	NOV22	-	-	-	0,0	0,0
FADA TOKOBIN Z3	NOV23	-	-	-	0,0	0,0
FADA TOKOBIN. Z	96FF	11,68	0,05	-	0,0	1693,3
GATA KOUARA T	96DD	24,05	0,07	-	0,0	2283,6
GOUBE MENASARA	NOV16	-	-	-	0,0	0,0
LIBO ATOU BABA	FEV11	-	-	-	0,0	2320,0
LIBO ATOU KOUAR	96FE	21,11	0,12	-	0,0	3289,0
MOUSSA DIOLO	96EC	16,43	0,07	-	0,0	994,5
NIABERI KOUARA	NOV19	-	-	-	0,0	0,0

**Tableau 3 : Concentrations chimiques de la silice et des métaux pour les eaux de la nappe phréatique et du groupe 3**

\* TDS calculée à partir de la somme des ions majeurs de la silice totalesous forme SiO2 et de l'aluminium totz sous forme Al2O3

Nom du puits	Référence de l'échantillon	$^{18}\text{O}$	$^2\text{H}$	$\text{A}^{14}\text{C}$
		‰ vs SMOW		pcm
BABAKAINAK VILL	AVI08	-2,80	-19,4	-
BANEY KAINA	NOV18	-	-	-
BANGOULA	SEP02	-3,96	-	-
BARKIAWEL BERI	AVG01	-2,41	-19,3	-
BARKIAWEL KAINA	96FA	-3,30	-22,2	-
BARKIAWEL VILLA	SEP06	-3,44	-	-
BARKIRE ALIDOU	96ED	-3,61	-25,2	-
BOYEY TONDI CLO	DEC30	-3,91	-20,7	-
DANGUEY GOROU	96DC	-4,39	-28,0	-
DELI TONDI	96GG	-4,20	-27,1	-
DEY TEGUI	AVI04	-2,86	-	-
GADABO	AVI06	-	-	-
GADABO FETOKADI	AVI07	-3,86	-	-
GARDAMA K. B11	96FG	-3,64	-28,2	-
GOUNOU BANGO F1	96GE	-3,53	-25,2	-
GOUNOU BANGO	96EA	-3,26	-20,0	-
KAREY BANGO FE	AVK07	-4,22	-	-
KOGOROU	96CA	-	-	-
KOGOROU	96AG	-	-	-
KOKIRE	96FC	-4,67	-27,3	-
KONE KAINA ECOL	96EE	-3,33	-22,6	-
KONE KAINA ECOL	JAN06	-3,24	-18,0	-
KONE KAINA FOR	FOR05	-	-	-
LAWEY	NOV21	-	-	-
LOBOTONDI FED	96DB	-2,54	-17,7	-
NIABERI KOUARA	96DA	-3,56	-22,8	-
OURA TONDI CHLO	DEC27	-	-	-
OURA TONDI CHLO	AVK13	-2,00	-18,7	-
POSTE POLICE	JAN08	-	-	-
POSTE POLICE	SEP18	-4,18	-	-
SAMARI ECOLE	DEC29	-	-	-
SAMARI KAINA FO	FOR04	-	-	106,0
SAMARI KAINA FO	JAN09	-4,59	-24,3	-
SAMARI MOSQUEE	DEC28	-	-	-
SAMARI MOSQUEE	95-61	-	-	126,1
SISAN TONDI ENC	AVK05	-4,23	-	-
SISAN TONDI K.T	96EB	-5,51	-30,7	-
TERA BOYEY TOND	96DF	-4,81	-26,9	-
WARI ECOLE	AVI02	-3,92	-	-
WARI PASTORAL	AVI03	-	-	-
WARI PASTORAL	JAN14	-4,39	-27,1	-
ZEIBANE FITI KO	96DG	-3,48	-19,0	-
ZIMBA	DEC31	-3,52	-26,8	-
Médiane		-3,64	-22,8	
Minimum		-6,41	-45,9	
Maximum		-2,00	-17,7	
DIOLE GOUBE KOU	96DE	-3,02	-19,9	-
FADA TOKOBIN Z1	NOV22	-	-	-
FADA TOKOBIN Z3	NOV23	-	-	-
FADA TOKOBIN. Z	96FF	-6,41	-45,9	-
GATA KOUARA T	96DD	-3,83	-24,6	-
GOUBE MENASARA	NOV16	-	-	-
LIBO ATOU BABA	FEV11	-	-	-
LIBO ATOU KOUAR	96FE	-2,58	-21,5	-
MOUSSA DIOLO	96EC	-3,76	-18,2	-
NIABERI KOUARA	NOV19	-	-	-

Tableau 4 : Teneurs isotopiques en  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  des eaux et activité  $^{14}\text{C}$  du CITD des nappes profondes et du groupe 3

Nom du puits	Longitude (est)	Latitude (nord)	Référence de l'échantillon	Référence de l'analyse	Aquifère capté	Conductivité	Conductivité	pH	pH	pH de	Température	Température
						de terrain	de laboratoire	de terrain	estimé *	laboratoire	de terrain	estimée **
						$\mu\text{S.cm}^{-1}$					$^{\circ}\text{C}$	
GUIRBEYE	2°33.18	14°00.78	JUL952	S11	sables inférieurs	1385	-	7,6	-	8,7	-	30,5
GOUNOU BANGO F2	2°08.40	13°49.00	96GB	SK	sables inférieurs	1033	-	6,5	-	7,59	-	31,5
KANDA	2°13.33	14°07.41	JD967	S1	sables inférieurs	1370	1344	7,4	-	-	-	31,8
SAMARI MAISOS F	2°15.04	13°56.13	96GF	P4	sables inférieurs	1442	-	-	-	7,7	-	30,5
ZIMBA	2°11.65	13°52.04	CT203	S4	sables inférieurs	1300	1331	7,7	-	7,9	-	30,5
ZIMBA FORAGE	2°11.40	13°52.20	96GD	S5	sables inférieurs	1430	-	-	7,7	7,7	-	30,5
<b>Médiane***</b>						1377		7,5		7,9		
<b>Minimum</b>						1033		6,5		7,7		
<b>Maximum</b>						1442		7,7		8,7		
KAREY BANGOU LO	2°10.88	13°52.30	95-29	S11	oolithes	1118	-	-	-	-	29,2	-
KAREY BANGOU LO	2°10.88	13°52.30	AVK14	S2	oolithes	1380	-	7,1	-	-	29,3	-
KAREY BANGOU LO	2°10.88	13°52.30	DEC32	S3	oolithes	1355	1432	7,1	-	7,7	-	29,2
KAREY BANGOU LO	2°10.88	13°52.30	MAR01	S12	oolithes	1370	-	7,5	-	-	-	29,2
LABOU TITILLO F2	2°15.59	13°46.98	96FB	SOO	socle+oolithes	1456	-	6,9	-	8,2	30,2	-
LAWEY FORAGE	2°11.53	13°42.94	96GH	SO	socle	628	-	7,3	-	7,5	-	30,5
NIABERI KOU.	2°00.65	13°59.51	JD961	P2	?	1355	-	7,3	-	-	-	30,5
SAMARI KAINA PF	2°13.82	13°57.74	96GA	P3	?	1445	-	-	7,0	7,9	-	30,5
SISAN MAOUREY F	2°15.92	13°54.36	96FD	P5	?	1444	-	7,1	-	7,7	29,3	-
SISAN MAOUR.	2°15.93	13°54.36	JD969	P6	?	1405	1372	7,3	-	-	-	30,5
LABOU TITILLO F1	2°15.54	13°46.80	96GI	P1	?	1476	-	-	6,9	8,3	-	30,2
<b>Médiane****</b>						1380		7,1		7,7	29,8	
<b>Minimum</b>						628		6,5		7,1	29,2	
<b>Maximum</b>						1476		7,7		8,7	31,8	

Tableau 5 : Paramètres physico-chimiques des eaux des nappes profondes et coordonnées des points de prélèvements

\* pH relevé lors de campagnes de mesures précédentes du programme hapex-Sahel

\*\* Température relevée lors de campagnes de mesures précédentes

Les températures estimées à 30,5°C ont été calculées par une moyenne pondérée de mesures faites sur le nord-ouest du degré carré (coefficient 2) et de mesures faites sur l'est du degré carré (in Le Gal La Salle 1992) (coefficient 1)

\*\*\* Les paramètres statistiques ne sont donnés que pour l'aquifère des sables inférieurs

\*\*\*\* Les paramètres statistiques sont donnés que pour l'ensemble des aquifères profonds de la zone d'étude

Nom du puits	Référence de l'échantillon	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq.l <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> de terrain	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Balance ionique
GUIRBEYE	JUL952	2,100	0,200	9,826	0,056	-	-	-	-	-	-
GOUNOU BANGO F2	96FB	2,530	2,040	9,320	0,280	5,140	-	3,670	5,210	0,020	0,5
KANDA	JD967	1,520	2,675	9,761	0,344	4,779	-	3,620	4,375	0,156	5,0
SAMARI MAISOS F	96GA	2,690	2,030	9,190	0,230	5,160	-	3,610	5,080	0,001	1,0
ZIMBA	CT203	3,081	2,754	7,922	0,236	4,855	-	3,545	4,952	0,001	2,3
ZIMBA FORAGE	96GD	3,010	2,240	8,460	0,230	4,880	-	3,480	5,300	0,001	1,0
Médiane*		2,610	2,140	9,255	0,233	4,880		3,610	5,080	0,001	
Minimum		1,520	0,200	7,922	0,056	4,779		3,480	4,375	0,001	
Maximum		5,630	2,754	9,826	0,344	6,000		3,670	5,300	0,156	
KAREY BANGOU LO	95-29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KAREY BANGOU LO	AVK14	5,630	3,454	4,900	0,280	5,460	5,920	2,520	5,705	0,368	0,8
KAREY BANGOU LO	DEC32	5,089	3,569	5,078	0,238	6,000	5,800	2,222	5,762	0,038	-0,2
KAREY BANGOU LO	MAR01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LABOU TITILLO F2	96GI	2,490	2,070	9,280	0,290	5,170	-	3,550	5,140	0,001	1,0
LAWEY FORAGE	96GH	2,190	0,840	3,520	0,090	4,200	-	0,430	2,030	0,001	-0,2
NIABERI KOU.	96GB	3,820	2,650	4,110	0,170	4,540	-	1,610	4,500	0,010	0,4
SAMARI KAINA PF	JD961	3,920	4,142	6,683	0,264	5,235	-	1,549	6,667	0,142	5,0
SISAN MAOUREY F	96GF	2,590	2,040	9,050	0,250	5,050	-	3,610	5,010	0,010	0,9
SISAN MAOUR.	96FD	2,420	2,020	9,740	0,270	5,240	-	3,610	5,220	0,001	1,3
LABOU TITILLO F1	JUL951	2,000	1,600	10,609	0,341	-	-	-	-	-	-
Médiane**		2,590	2,070	9,050	0,250	5,095		3,547	5,110	0,010	
Minimum		1,520	0,260	3,520	0,056	4,200		0,430	2,030	0,001	
Maximum		5,630	4,142	10,609	0,344	6,000		3,775	6,667	0,368	

Tableau 6 : Concentrations chimiques des eaux des nappes profondes (meq.l<sup>-1</sup>)

\* Les paramètres statistiques ne sont donnés que pour l'aquifère des sables inférieurs

\*\* Les paramètres statistiques sont donnés que pour l'ensemble des aquifères profonds de la zone d'étude

Nom du puits	Référence de l'échantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	TDS	TDS recalculée *
mg.l-1						
GUIRBEYE	JUL952	-	-	-	-	272,6
GOUNOU BANGO F2	96GB	8,06	0,00	0,03	-	768,2
KANDA	JD967	-	-	-	-	940,1
SAMARI MAISOS F	96GF	7,48	0,00	0,02	-	979
ZIMBA	CT203	16,12	-	-	-	962
ZIMBA FORAGE	96GD	7,62	0,00	0,02	-	973,9
<b>Médiane**</b>		<b>18,03</b>				<b>962,0</b>
<b>Minimum</b>		<b>7,62</b>				<b>768,2</b>
<b>Maximum</b>		<b>20,37</b>				<b>976,0</b>
KAREY BANGOU LO	95-29	-	-	-	-	-
KAREY BANGOU LO	AVK14	19,95	-	-	1017,8	1016,8
KAREY BANGOU LO	DEC32	20,37	0,03	8,49	1015,9	1023,4
KAREY BANGOU LO	MAR01	-	-	-	-	-
LABOU TITILLO F2	96FB	7,79	0,00	-	-	1003,3
LAWEY FORAGE	96GH	25,70	0,00	-	-	533
NIABERI KOU.	JD961	-	-	-	-	995,3
SAMARI KAINA PF	96GA	7,56	0,00	-	-	992,9
SISAN MAOUREY F	96FD	6,94	0,00	0,03	-	1012,6
SISAN MAOUR.	JD969	-	-	-	-	956,9
LABOU TITILLO F1	96GI	7,22	0,00	0,01	-	994,8
<b>Médiane***</b>		<b>7,79</b>				<b>985,9</b>
<b>Minimum</b>		<b>6,94</b>				<b>533,0</b>
<b>Maximum</b>		<b>25,70</b>				<b>1023,4</b>

Tableau 7 : Concentrations chimiques des eaux des nappes profondes

\* TDS calculée à partir de la somme des ions majeurs de la silice totale sous forme SiO<sub>2</sub> et de l'aluminium total sous forme Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

\*\* Les paramètres statistiques ne sont donnés que pour l'aquifère des sables inférieurs

\*\*\* Les paramètres statistiques sont donnés que pour l'ensemble des aquifères profonds de la zone d'étude

Nom du puits	Référence de l'échantillon	<sup>18</sup> O	<sup>2</sup> H	A <sup>14</sup> C
		‰ vs SMOW		pcm
GOUNOU BANGO F2	96GB	-6,83	-51,1	-
GUIRBEYE	JUL952	-7,70	-59,3	-
KANDA	JD967	-	-	-
SAMARI MAISOS F	96GF	-7,11	-52,3	-
ZIMBA	CT203	-7,60	-57,0	2,3
ZIMBA FORAGE	96GD	-7,26	-54,7	-
<b>Médiane***</b>		<b>-7,26</b>	<b>-54,7</b>	
<b>Minimum</b>		<b>-7,70</b>	<b>-59,3</b>	
<b>Maximum</b>		<b>-6,83</b>	<b>-51,1</b>	
KAREY BANGOU LO	95-29	-	-	12,1
KAREY BANGOU LO	AVK14	-6,60	-	-
KAREY BANGOU LO	DEC32	-6,76	-	-
KAREY BANGOU LO	MAR01	-6,55	-49,5	-
LABOU TITILLO F2	96FB	-7,50	-54,6	-
LAWEY FORAGE	96GH	-6,65	-44,0	-
NIABERI KOU.	JD961	-	-	-
SAMARI KAINA PF	96GA	-7,39	-54,1	-
SISAN MAOUREY F	96FD	-7,83	-53,0	-
SISAN MAOUR.	JD969	-	-	-
LABOU TITILLO F1	96GI	-	-	-
<b>Médiane***</b>		<b>-7,18</b>	<b>-54,1</b>	
<b>Minimum</b>		<b>-7,83</b>	<b>-59,3</b>	
<b>Maximum</b>		<b>-6,55</b>	<b>-44,0</b>	

Tableau 8 : Teneurs isotopiques en <sup>18</sup>O et <sup>2</sup>H des eaux et activité <sup>14</sup>C du CITD des nappes profondes

\*\* Les paramètres statistiques ne sont donnés que pour l'aquifère des sables inférieurs

\*\*\* Les paramètres statistiques sont donnés que pour l'ensemble des aquifères profonds de la zone d'étude

# **ANNEXE II**

N1

pQ	pKs	I.S.	
-11.4594	-8.37000	-3.08943	calcite CaCO3
-8.70917	-4.84000	-3.86917	gypseCaSO4,2H2O
-3.56229	-4.00000	.437707	Quartz SiO2
-3.56229	-2.70000	-.862293	Silice SiO2
-23.3064	-18.0000	-5.30645	DolomiteCaMgCO32

N2

pQ	pKs	I.S.	
-10.0183	-8.37000	-1.64832	calcite CaCO3
-7.44746	-4.84000	-2.60746	gypseCaSO4,2H2O
-3.51160	-4.00000	.488404	Quartz SiO2
-3.51160	-2.70000	-.811596	Silice SiO2
-20.3966	-18.0000	-2.39661	DolomiteCaMgCO32

N3

pQ	pKs	I.S.	
-12.1712	-8.37000	-3.80120	calcite CaCO3
-9.95728	-4.84000	-5.11728	gypseCaSO4,2H2O
-3.48711	-4.00000	.512891	Quartz SiO2
-3.48711	-2.70000	-.787109	Silice SiO2
-24.6301	-18.0000	-6.63011	DolomiteCaMgCO32

N4

pQ	pKs	I.S.	
-11.0866	-8.37000	-2.71659	calcite CaCO3
-6.99622	-4.84000	-2.15622	gypseCaSO4,2H2O
-3.80198	-4.00000	.198017	Quartz SiO2
-3.80198	-2.70000	-1.10198	Silice SiO2
-22.6498	-18.0000	-4.64982	DolomiteCaMgCO32

N5

pQ	pKs	I.S.	
-12.8304	-8.37000	-4.46042	calcite CaCO3
-9.06415	-4.84000	-4.22415	gypseCaSO4,2H2O
-3.39179	-4.00000	.608208	Quartz SiO2
-3.39179	-2.70000	-.691792	Silice SiO2
-26.0322	-18.0000	-8.03224	DolomiteCaMgCO32

N6

pQ	pKs	I.S.	
-11.7372	-8.37000	-3.36717	calcite CaCO3
-8.65456	-4.84000	-3.81456	gypseCaSO4,2H2O
-3.71220	-4.00000	.287804	Quartz SiO2
-3.71220	-2.70000	-1.01220	Silice SiO2
-23.6816	-18.0000	-5.68160	DolomiteCaMgCO32

N7

pQ	pKs	I.S.	
-11.1722	-8.37000	-2.80219	calcite CaCO3
-8.14425	-4.84000	-3.30425	gypseCaSO4,2H2O
-3.22207	-4.00000	.777929	Quartz SiO2
-3.22207	-2.70000	-.522071	Silice SiO2
-22.5621	-18.0000	-4.56214	DolomiteCaMgCO32

N8

pQ	pKs	I.S.	
-12.8391	-8.37000	-4.46912	calcite CaCO3
-9.27558	-4.84000	-4.43558	gypseCaSO4,2H2O
-3.94198	-4.00000	.580201E-01	Quartz SiO2
-3.94198	-2.70000	-1.24198	Silice SiO2
-26.3135	-18.0000	-8.31355	DolomiteCaMgCO32

N9

pQ	pKs	I.S.	
-12.0311	-8.37000	-3.66112	calcite CaCO3
-9.68404	-4.84000	-4.84404	gypseCaSO4,2H2O
-3.50983	-4.00000	.490168	Quartz SiO2
-3.50983	-2.70000	-.809832	Silice SiO2
-24.3097	-18.0000	-6.30973	DolomiteCaMgCO32

N10

pQ	pKs	I.S.	
-11.0647	-8.37000	-2.69472	calcite CaCO3
-9.78605	-4.84000	-4.94605	gypseCaSO4,2H2O
-3.44715	-4.00000	.552848	Quartz SiO2
-3.44715	-2.70000	-.747152	Silice SiO2
-22.5536	-18.0000	-4.55359	DolomiteCaMgCO32

N11

pQ	pKs	I.S.	
-19.5016	-8.37000	-11.1316	calcite CaCO3
-9.83827	-4.84000	-4.99827	gypseCaSO4,2H2O
-3.49858	-4.00000	.501420	Quartz SiO2
-3.49858	-2.70000	-.798580	Silice SiO2
-39.3190	-18.0000	-21.3190	DolomiteCaMgCO32

N12

pQ	pKs	I.S.	
-11.3037	-8.37000	-2.93373	calcite CaCO3
-6.87999	-4.84000	-2.03999	gypseCaSO4,2H2O
-3.39266	-4.00000	.607340	Quartz SiO2
-3.39266	-2.70000	-.692660	Silice SiO2
-22.9610	-18.0000	-4.96100	DolomiteCaMgCO32

N13

pQ	pKs	I.S.	
-12.8984	-8.37000	-4.52842	calcite CaCO3
-7.84324	-4.84000	-3.00324	gypseCaSO4,2H2O
-3.91250	-4.00000	.875024E-01	Quartz SiO2
-3.91250	-2.70000	-1.21250	Silice SiO2
-26.0787	-18.0000	-8.07871	DolomiteCaMgCO32

N14

pQ	pKs	I.S.	
-12.1957	-8.37000	-3.82575	calcite CaCO3
-8.08693	-4.84000	-3.24693	gypseCaSO4,2H2O
-3.91607	-4.00000	.839255E-01	Quartz SiO2
-3.91607	-2.70000	-1.21607	Silice SiO2
-24.6974	-18.0000	-6.69744	DolomiteCaMgCO32

N15

pQ	pKs	I.S.	
-10.5233	-8.37000	-2.15327	calcite CaCO3
-6.93781	-4.84000	-2.09781	gypseCaSO4,2H2O
-3.10775	-4.00000	.892254	Quartz SiO2
-3.10775	-2.70000	-.407746	Silice SiO2
-21.3354	-18.0000	-3.33535	DolomiteCaMgCO32

N16

pQ	pKs	I.S.	
-11.6724	-8.37000	-3.30235	calcite CaCO3
-8.37892	-4.84000	-3.53892	gypseCaSO4,2H2O
-3.76653	-4.00000	.233473	Quartz SiO2
-3.76653	-2.70000	-1.06653	Silice SiO2
-23.8687	-18.0000	-5.86875	DolomiteCaMgCO32

N17

pQ	pKs	I.S.	
-11.7383	-8.37000	-3.36827	calcite CaCO3
-7.46359	-4.84000	-2.62359	gypseCaSO4,2H2O
-3.76701	-4.00000	.232989	Quartz SiO2
-3.76701	-2.70000	-1.06701	Silice SiO2
-23.8525	-18.0000	-5.85254	DolomiteCaMgCO32

N18

pQ	pKs	I.S.	
-12.2624	-8.37000	-3.89241	calcite CaCO3
-8.66987	-4.84000	-3.82987	gypseCaSO4,2H2O
-3.95465	-4.00000	.453543E-01	Quartz SiO2
-3.95465	-2.70000	-1.25465	Silice SiO2
-25.1647	-18.0000	-7.16471	DolomiteCaMgCO32

N19

pQ	pKs	I.S.	
-12.5305	-8.37000	-4.16045	calcite CaCO3
-8.87949	-4.84000	-4.03949	gypseCaSO4,2H2O
-6.99995	-4.00000	-2.99995	Quartz SiO2
-6.99995	-2.70000	-4.29995	Silice SiO2
-25.1126	-18.0000	-7.11256	DolomiteCaMgCO32

N20

pQ	pKs	I.S.	
-13.4533	-8.37000	-5.08332	calcite CaCO3
-8.27340	-4.84000	-3.43340	gypseCaSO4,2H2O
-3.58050	-4.00000	.419502	Quartz SiO2
-3.58050	-2.70000	-.880498	Silice SiO2
-27.2368	-18.0000	-9.23679	DolomiteCaMgCO32

N21

pQ	pKs	I.S.	
-11.6292	-8.37000	-3.25915	calcite CaCO3
-8.02914	-4.84000	-3.18914	gypseCaSO4,2H2O
-3.30567	-4.00000	.694330	Quartz SiO2
-3.30567	-2.70000	-.605670	Silice SiO2
-23.5717	-18.0000	-5.57174	DolomiteCaMgCO32

N22

pQ	pKs	I.S.	
-12.5722	-8.37000	-4.20221	calcite CaCO3
-7.83515	-4.84000	-2.99515	gypseCaSO4,2H2O
-3.77771	-4.00000	.222288	Quartz SiO2
-3.77771	-2.70000	-1.07771	Silice SiO2
-25.3593	-18.0000	-7.35931	DolomiteCaMgCO32

N23

pQ	pKs	I.S.	
-11.1167	-8.37000	-2.74672	calcite CaCO3
-8.01206	-4.84000	-3.17206	gypseCaSO4,2H2O
-3.59913	-4.00000	.400867	Quartz SiO2
-3.59913	-2.70000	-.899133	Silice SiO2
-22.5460	-18.0000	-4.54604	DolomiteCaMgCO32

N24

pQ	pKs	I.S.	
-11.4980	-8.37000	-3.12798	calcite CaCO3
-8.33809	-4.84000	-3.49809	gypseCaSO4,2H2O
-3.59737	-4.00000	.402628	Quartz SiO2
-3.59737	-2.70000	-.897372	Silice SiO2
-23.3186	-18.0000	-5.31855	DolomiteCaMgCO32

N25

pQ	pKs	I.S.	
-12.2092	-8.37000	-3.83916	calcite CaCO3
-9.19005	-4.84000	-4.35005	gypseCaSO4,2H2O
-3.75958	-4.00000	.240422	Quartz SiO2
-3.75958	-2.70000	-1.05958	Silice SiO2
-24.8733	-18.0000	-6.87334	DolomiteCaMgCO32

N26

pQ	pKs	I.S.	
-11.5140	-8.37000	-3.14397	calcite CaCO3
-10.0623	-4.84000	-5.22232	gypseCaSO4,2H2O
-7.00014	-4.00000	-3.00014	Quartz SiO2
-7.00014	-2.70000	-4.30014	Silice SiO2
-22.9810	-18.0000	-4.98101	DolomiteCaMgCO32

N27

pQ	pKs	I.S.	
-10.6246	-8.37000	-2.25463	calcite CaCO3
-7.72437	-4.84000	-2.88437	gypseCaSO4,2H2O
-3.50324	-4.00000	.496761	Quartz SiO2
-3.50324	-2.70000	-.803239	Silice SiO2
-21.9839	-18.0000	-3.98389	DolomiteCaMgCO32

N28

pQ	pKs	I.S.	
-12.4267	-8.37000	-4.05667	calcite CaCO3
-7.63534	-4.84000	-2.79534	gypseCaSO4,2H2O
-6.99990	-4.00000	-2.99990	Quartz SiO2
-6.99990	-2.70000	-4.29990	Silice SiO2
-24.7526	-18.0000	-6.75256	DolomiteCaMgCO32

N29

pQ	pKs	I.S.	
-17.5663	-8.37000	-9.19634	calcite CaCO3
-7.60852	-4.84000	-2.76852	gypseCaSO4,2H2O
-3.36815	-4.00000	.631849	Quartz SiO2
-3.36815	-2.70000	-.668151	Silice SiO2
-35.3502	-18.0000	-17.3502	DolomiteCaMgCO32

N30

pQ	pKs	I.S.	
-11.0788	-8.37000	-2.70883	calcite CaCO3
-8.11846	-4.84000	-3.27846	gypseCaSO4,2H2O
-3.46879	-4.00000	.531206	Quartz SiO2
-3.46879	-2.70000	-.768794	Silice SiO2
-23.3504	-18.0000	-5.35039	DolomiteCaMgCO32

N31

pQ	pKs	I.S.	
-11.7883	-8.37000	-3.41830	calcite CaCO3
-10.1450	-4.84000	-5.30499	gypseCaSO4,2H2O
-3.28545	-4.00000	.714549	Quartz SiO2
-3.28545	-2.70000	-.585451	Silice SiO2
-24.3479	-18.0000	-6.34793	DolomiteCaMgCO32

N32

pQ	pKs	I.S.	
-11.7453	-8.37000	-3.37529	calcite CaCO3
-7.96250	-4.84000	-3.12250	gypseCaSO4,2H2O
-3.88019	-4.00000	.119808	Quartz SiO2
-3.88019	-2.70000	-1.18019	Silice SiO2
-24.1714	-18.0000	-6.17142	DolomiteCaMgCO32

N33

pQ	pKs	I.S.	
-12.2537	-8.37000	-3.88370	calcite CaCO3
-9.05316	-4.84000	-4.21316	gypseCaSO4,2H2O
-3.62219	-4.00000	.377812	Quartz SiO2
-3.62219	-2.70000	-.922188	Silice SiO2
-25.1679	-18.0000	-7.16790	DolomiteCaMgCO32

N34

pQ	pKs	I.S.	
-11.0070	-8.37000	-2.63701	calcite CaCO3
-8.40346	-4.84000	-3.56346	gypseCaSO4,2H2O
-3.49293	-4.00000	.507067	Quartz SiO2
-3.49293	-2.70000	-.792933	Silice SiO2
-22.3309	-18.0000	-4.33087	DolomiteCaMgCO32

N35

pQ	pKs	I.S.	
-12.0206	-8.37000	-3.65055	calcite CaCO3
-10.1844	-4.84000	-5.34439	gypseCaSO4,2H2O
-3.53860	-4.00000	.461395	Quartz SiO2
-3.53860	-2.70000	-.838605	Silice SiO2
-24.3669	-18.0000	-6.36692	DolomiteCaMgCO32

N36

pQ	pKs	I.S.	
-12.5056	-8.37000	-4.13564	calcite CaCO3
-8.40771	-4.84000	-3.56771	gypseCaSO4,2H2O
-3.97060	-4.00000	.293976E-01	Quartz SiO2
-3.97060	-2.70000	-1.27060	Silice SiO2
-25.5592	-18.0000	-7.55925	DolomiteCaMgCO32

N37

pQ	pKs	I.S.	
-11.3462	-8.37000	-2.97625	calcite CaCO3
-8.28162	-4.84000	-3.44162	gypseCaSO4,2H2O
-3.56319	-4.00000	.436810	Quartz SiO2
-3.56319	-2.70000	-.863190	Silice SiO2
-23.0564	-18.0000	-5.05642	DolomiteCaMgCO32

A1

pQ	pKs	I.S.	
-9.73427	-8.37000	-1.36427	calcite CaCO3
-6.87043	-4.84000	-2.03043	gypseCaSO4,2H2O
-3.62177	-4.00000	.378226	Quartz SiO2
-3.62177	-2.70000	-.921774	Silice SiO2
-19.6406	-18.0000	-1.64063	DolomiteCaMgCO32

A2

pQ	pKs	I.S.	
-8.63837	-8.37000	-.268367	calcite CaCO3
-5.51859	-4.84000	-.678588	gypseCaSO4,2H2O
-3.71096	-4.00000	.289040	Quartz SiO2
-3.71096	-2.70000	-1.01096	Silice SiO2
-17.3974	-18.0000	.602613	DolomiteCaMgCO32

A3

pQ	pKs	I.S.	
-8.95974	-8.37000	-.589743	calcite CaCO3
-4.93432	-4.84000	-.943217E-01	gypseCaSO4,2H2O
-3.39642	-4.00000	.603579	Quartz SiO2
-3.39642	-2.70000	-.696421	Silice SiO2
-18.1180	-18.0000	-.117985	DolomiteCaMgCO32

A4

pQ	pKs	I.S.	
-8.47081	-8.37000	-.100814	calcite CaCO3
-4.98836	-4.84000	-.148356	gypseCaSO4,2H2O
-6.99954	-4.00000	-2.99954	Quartz SiO2
-6.99954	-2.70000	-4.29954	Silice SiO2
-17.3304	-18.0000	.669612	DolomiteCaMgCO32

A5

pQ	pKs	I.S.	
-8.69401	-8.37000	-.324009	calcite CaCO3
-4.62270	-4.84000	.217300	gypseCaSO4,2H2O
-3.45204	-4.00000	.547960	Quartz SiO2
-3.45204	-2.70000	-.752040	Silice SiO2
-17.9475	-18.0000	.524740E-01	DolomiteCaMgCO32

A6

pQ	pKs	I.S.	
-11.4388	-8.37000	-3.06883	calcite CaCO3
-5.58571	-4.84000	-.745710	gypseCaSO4,2H2O
-3.56200	-4.00000	.437998	Quartz SiO2
-3.56200	-2.70000	-.862002	Silice SiO2
-23.0557	-18.0000	-5.05566	DolomiteCaMgCO32

SK

pQ	pKs	I.S.	
-9.56188	-8.37000	-1.19188	calcite CaCO3
-5.95556	-4.84000	-1.11556	gypseCaSO4,2H2O
-3.87179	-4.00000	.128214	Quartz SiO2
-3.87179	-2.70000	-1.17179	Silice SiO2
-19.2610	-18.0000	-1.26100	DolomiteCaMgCO32

S1

pQ	pKs	I.S.	
-8.89125	-8.37000	-.521248	calcite CaCO3
-6.39290	-4.84000	-1.55290	gypseCaSO4,2H2O
-7.00228	-4.00000	-3.00228	Quartz SiO2
-7.00228	-2.70000	-4.30228	Silice SiO2
-17.5126	-18.0000	.487421	DolomiteCaMgCO32

S2

pQ	pKs	I.S.	
-8.73036	-8.37000	-.360360	calcite CaCO3
-5.75797	-4.84000	-.917974	gypseCaSO4,2H2O
-3.47875	-4.00000	.521247	Quartz SiO2
-3.47875	-2.70000	-.778753	Silice SiO2
-17.6456	-18.0000	.354369	DolomiteCaMgCO32

S3

pQ	pKs	I.S.	
-8.77623	-8.37000	-.406233	calcite CaCO3
-5.79163	-4.84000	-.951631	gypseCaSO4,2H2O
-3.46971	-4.00000	.530290	Quartz SiO2
-3.46971	-2.70000	-.769710	Silice SiO2
-17.6794	-18.0000	.320635	DolomiteCaMgCO32

P1

pQ	pKs	I.S.	
-9.24543	-8.37000	-.875432	calcite CaCO3
-6.11074	-4.84000	-1.27074	gypseCaSO4,2H2O
-3.92005	-4.00000	.799480E-01	Quartz SiO2
-3.92005	-2.70000	-1.22005	Silice SiO2
-18.5465	-18.0000	-.546459	DolomiteCaMgCO32

S00

pQ	pKs	I.S.	
-9.25105	-8.37000	-.881053	calcite CaCO3
-6.09864	-4.84000	-1.25864	gypseCaSO4,2H2O
-3.88704	-4.00000	.112959	Quartz SiO2
-3.88704	-2.70000	-1.18704	Silice SiO2
-18.5713	-18.0000	-.571293	DolomiteCaMgCO32

S0

pQ	pKs	I.S.	
-9.12440	-8.37000	-.754397	calcite CaCO3
-6.40738	-4.84000	-1.56738	gypseCaSO4,2H2O
-3.36926	-4.00000	.630736	Quartz SiO2
-3.36926	-2.70000	-.669264	Silice SiO2
-18.6462	-18.0000	-.646167	DolomiteCaMgCO32

P2

pQ	pKs	I.S.	
-8.59289	-8.37000	-.222891	calcite CaCO3
-5.86042	-4.84000	-1.02042	gypseCaSO4,2H2O
-7.00152	-4.00000	-3.00152	Quartz SiO2
-7.00152	-2.70000	-4.30152	Silice SiO2
-17.1352	-18.0000	.864848	DolomiteCaMgCO32

P3

pQ	pKs	I.S.	
-9.16889	-8.37000	-.798890	calcite CaCO3
-6.08387	-4.84000	-1.24387	gypseCaSO4,2H2O
-3.90004	-4.00000	.999588E-01	Quartz SiO2
-3.90004	-2.70000	-1.20004	Silice SiO2
-18.4357	-18.0000	-.435741	DolomiteCaMgCO32

P4

pQ	pKs	I.S.	
-8.88511	-8.37000	-.515113	calcite CaCO3
-6.10228	-4.84000	-1.26228	gypseCaSO4,2H2O
-3.90552	-4.00000	.944810E-01	Quartz SiO2
-3.90552	-2.70000	-1.20552	Silice SiO2
-17.8502	-18.0000	.149793	DolomiteCaMgCO32

P5

pQ	pKs	I.S.	
-9.11322	-8.37000	-.743222	calcite CaCO3
-6.11834	-4.84000	-1.27834	gypseCaSO4,2H2O
-3.93724	-4.00000	.627589E-01	Quartz SiO2
-3.93724	-2.70000	-1.23724	Silice SiO2
-18.2787	-18.0000	-.278713	DolomiteCaMgCO32

P6

pQ	pKs	I.S.	
-8.97302	-8.37000	-.603016	calcite CaCO3
-6.31705	-4.84000	-1.47705	gypseCaSO4,2H2O
-7.00156	-4.00000	-3.00156	Quartz SiO2
-7.00156	-2.70000	-4.30156	Silice SiO2
-17.7263	-18.0000	.273664	DolomiteCaMgCO32

S4

pQ	pKs	I.S.	
-8.36184	-8.37000	.816320E-02	calcite CaCO3
-6.04497	-4.84000	-1.20497	gypseCaSO4,2H2O
-3.57542	-4.00000	.424578	Quartz SiO2
-3.57542	-2.70000	-.875422	Silice SiO2
-16.7488	-18.0000	1.25119	DolomiteCaMgCO32

S5

pQ	pKs	I.S.	
-8.40015	-8.37000	-.301476E-01	calcite CaCO3
-6.02186	-4.84000	-1.18186	gypseCaSO4,2H2O
-3.90089	-4.00000	.991124E-01	Quartz SiO2
-3.90089	-2.70000	-1.20089	Silice SiO2
-16.9061	-18.0000	1.09393	DolomiteCaMgCO32

# **ANNEXE III**

N1

pQ	pKs	I.S.	
-10.9965	-8.37000	-2.62650	calcite CaCO3
-8.71393	-4.84000	-3.87393	gypseCaSO4,2H2O
-3.56229	-4.00000	.437707	Quartz SiO2
-3.56229	-2.70000	-.862293	Silice SiO2
-22.3781	-18.0000	-4.37813	DolomiteCaMgCO32

N3

pQ	pKs	I.S.	
-11.7573	-8.37000	-3.38729	calcite CaCO3
-9.95955	-4.84000	-5.11955	gypseCaSO4,2H2O
-3.48711	-4.00000	.512891	Quartz SiO2
-3.48711	-2.70000	-.787109	Silice SiO2
-23.8010	-18.0000	-5.80096	DolomiteCaMgCO32

N7

pQ	pKs	I.S.	
-10.4685	-8.37000	-2.09848	calcite CaCO3
-8.15332	-4.84000	-3.31332	gypseCaSO4,2H2O
-3.22207	-4.00000	.777929	Quartz SiO2
-3.22207	-2.70000	-.522071	Silice SiO2
-21.1496	-18.0000	-3.14960	DolomiteCaMgCO32

N9

pQ	pKs	I.S.	
-10.7158	-8.37000	-2.34580	calcite CaCO3
-9.69388	-4.84000	-4.85388	gypseCaSO4,2H2O
-3.50983	-4.00000	.490168	Quartz SiO2
-3.50983	-2.70000	-.809832	Silice SiO2
-21.6733	-18.0000	-3.67332	DolomiteCaMgCO32

N10

pQ	pKs	I.S.	
-10.5105	-8.37000	-2.14054	calcite CaCO3
-9.79617	-4.84000	-4.95617	gypseCaSO4,2H2O
-3.44715	-4.00000	.552847	Quartz SiO2
-3.44715	-2.70000	-.747153	Silice SiO2
-21.4397	-18.0000	-3.43970	DolomiteCaMgCO32

N11

pQ	pKs	I.S.	
-10.6171	-8.37000	-2.24714	calcite CaCO3
-9.83438	-4.84000	-4.99438	gypseCaSO4,2H2O
-3.49887	-4.00000	.501132	Quartz SiO2
-3.49887	-2.70000	-.798868	Silice SiO2
-21.5434	-18.0000	-3.54343	DolomiteCaMgCO32

N15

pQ	pKs	I.S.	
-10.3884	-8.37000	-2.01841	calcite CaCO3
-6.93987	-4.84000	-2.09987	gypseCaSO4,2H2O
-3.10775	-4.00000	.892254	Quartz SiO2
-3.10775	-2.70000	-.407746	Silice SiO2
-21.0644	-18.0000	-3.06444	DolomiteCaMgCO32

N23

pQ	pKs	I.S.	
-10.3428	-8.37000	-1.97278	calcite CaCO3
-8.03165	-4.84000	-3.19165	gypseCaSO4,2H2O
-3.59913	-4.00000	.400865	Quartz SiO2
-3.59913	-2.70000	-.899135	Silice SiO2
-20.9875	-18.0000	-2.98749	DolomiteCaMgCO32

N24

pQ	pKs	I.S.	
-10.5837	-8.37000	-2.21373	calcite CaCO3
-8.35852	-4.84000	-3.51852	gypseCaSO4,2H2O
-3.59737	-4.00000	.402626	Quartz SiO2
-3.59737	-2.70000	-.897374	Silice SiO2
-21.4790	-18.0000	-3.47904	DolomiteCaMgCO32

N27

pQ	pKs	I.S.	
-10.3971	-8.37000	-2.02712	calcite CaCO3
-7.72862	-4.84000	-2.88862	gypseCaSO4,2H2O
-3.50324	-4.00000	.496761	Quartz SiO2
-3.50324	-2.70000	-.803239	Silice SiO2
-21.5263	-18.0000	-3.52626	DolomiteCaMgCO32

N30

pQ	pKs	I.S.	
-10.7765	-8.37000	-2.40652	calcite CaCO3
-8.12239	-4.84000	-3.28239	gypseCaSO4,2H2O
-3.46879	-4.00000	.531206	Quartz SiO2
-3.46879	-2.70000	-.768794	Silice SiO2
-22.7435	-18.0000	-4.74353	DolomiteCaMgCO32

N31

pQ	pKs	I.S.	
-11.5280	-8.37000	-3.15803	calcite CaCO3
-10.1470	-4.84000	-5.30701	gypseCaSO4,2H2O
-3.28545	-4.00000	.714549	Quartz SiO2
-3.28545	-2.70000	-.585451	Silice SiO2
-23.8263	-18.0000	-5.82627	DolomiteCaMgCO32

N32

pQ	pKs	I.S.	
-11.6877	-8.37000	-3.31769	calcite CaCO3
-7.96281	-4.84000	-3.12281	gypseCaSO4,2H2O
-3.88019	-4.00000	.119808	Quartz SiO2
-3.88019	-2.70000	-1.18019	Silice SiO2
-24.0560	-18.0000	-6.05603	DolomiteCaMgCO32

N34

pQ	pKs	I.S.	
-10.5406	-8.37000	-2.17056	calcite CaCO3
-8.40764	-4.84000	-3.56764	gypseCaSO4,2H2O
-3.49293	-4.00000	.507067	Quartz SiO2
-3.49293	-2.70000	-.792933	Silice SiO2
-21.3957	-18.0000	-3.39570	DolomiteCaMgCO32

# **ANNEXE IV**

Enreg. N°	xlon	ylat	lon	lat	village	refere	ref	vil
1	2°19.20	13°48.76	2.3204	13.8141	BABAKAINAK VILL	AVI08	N1	BAB
2	2°1.54	13°58.60	2.0257	13.9767	BANEY KAINA	NOV18	NI1	BAN
3	1°59.75	13°36.38	1.9958	13.6063	BANGOULA	SEP02	N2	BAG
4	2°18.67	13°32.73	2.3113	13.5450	BARKIAWEL BERI	AVG01	N3	BAR
5	2°10.88	13°41.53	2.1813	13.6922	BARKIAWEL KAINA	96FA	N4	BAK
6	2°18.67	13°32.73	2.3112	13.5455	BARKIAWEL VILLA	SEP06	N5	BAR
7	2°5.76	13°37.31	2.0960	13.6219	BARKIRE ALIDOU	96ED	N6	BAA
8	2°14.49	13°53.90	2.2415	13.8984	BOYEY TONDI CLO	DEC30	N7	BOY
9	2°0.53	13°47.66	2.0089	13.7943	DANGUEY GOROU	96DC	N8	DAN
10	2°12.23	13°59.67	2.2038	13.9945	DELI TONDI	96GG	N81	DEL
11	2°18.68	13°41.10	2.3113	13.6862	DEY TEGUI	AVI04	N9	DEY
12	2°4.51	13°51.82	2.0752	13.8637	DIOLE GOUBE KOU	96DE	A1	DIO
13	2°12.94	13°44.85	2.2157	13.7475	FADA TOKOBIN Z1	NOV22	NI2	FAD
14	2°12.96	13°44.88	2.2160	13.7480	FADA TOKOBIN Z3	NOV23	NI3	FAD
15	2°12.94	13°44.85	2.2157	13.7475	FADA TOKOBIN. Z	96FF	A2	FAD
16	2°17.90	13°46.34	2.2984	13.7723	GADABO	AVI06	N10	GAD
17	2°19.58	13°46.34	2.3264	13.7723	GADABO FETOKADI	AVI07	N11	GAF
18	2°15.80	13°50.08	2.2633	13.8347	GARDAMA K. B11	96FG	N12	GAR
19	2°1.03	13°56.64	2.0172	13.9440	GATA KOUARA T	96DD	A3	GAT
20	2°5.15	13°51.52	2.0858	13.8587	GOUBE MENASARA	NOV16	NI4	GOB
21	2°8.56	13°48.90	2.1427	13.8150	GOUNOU BANGO F1	96GE	N13	GOU
22	2°8.57	13°48.93	2.1429	13.8155	GOUNOU BANGOU	96EA	N14	GOU
23	2°10.64	13°53.17	2.1773	13.8861	KAREY BANGOU FE	AVK07	N15	KAR
24	2°14.96	13°32.30	2.2493	13.5383	KOGOROU	96CA	N16	KOG
25	2°14.96	13°32.30	2.2493	13.5383	KOGOROU	96AG	N161	KOG
26	2°12.50	13°42.19	2.2084	13.7031	KOKIRE	96FC	N17	KOK
27	2°5.93	13°41.90	2.0988	13.6984	KONE KAINA ECOL	96EE	N18	KOK
28	2°5.93	13°41.90	2.0988	13.6984	KONE KAINA ECOL	JAN06	N19	KOK
29	2°6.00	13°42.00	2.1000	13.7000	KONE KAINA FOR	FOR05	N20	KOK
30	2°11.69	13°42.72	2.1948	13.7120	LAWEY	NOV21	NI5	LAW
31	2°15.02	13°53.69	2.2503	13.8948	LIBO ATOU BABA	FEV11	A4	LIB
32	2°15.00	13°54.00	2.2500	13.9000	LIBO ATOU KOUAR	96FE	A5	LIB
33	2°0.04	13°57.33	2.0007	13.9555	LOBOTONDI FED	96DB	N21	LOB
34	2°5.98	13°47.32	2.0997	13.7887	MOUSSA DIOLO	96EC	A6	MOU
35	2°0.72	13°59.48	2.0120	13.9913	NIABERI KOUARA	NOV19	NI6	NIA
36	2°0.72	13°59.48	2.0120	13.9913	NIABERI KOUARA	96DA	N22	NIA
37	2°19.79	13°54.92	2.3298	13.9154	OURA TONDI CHLO	DEC27	N23	OUR
38	2°19.79	13°54.92	2.3298	13.9154	OURA TONDI CHLO	AVK13	N24	OUR
39	2°10.63	13°31.69	2.1772	13.5282	POSTE POLICE	JAN08	N26	POS
40	2°10.63	13°31.69	2.1772	13.5282	POSTE POLICE	SEP18	N25	POS
41	2°15.95	13°56.74	2.2659	13.9456	SAMARI ECOLE	DEC29	N27	SAM
42	2°13.67	13°57.91	2.2278	13.9652	SAMARI KAINA FO	FOR04	N28	SAK
43	2°13.67	13°57.91	2.2278	13.9652	SAMARI KAINA FO	JAN09	N29	SAK
44	2°16.16	13°56.68	2.2693	13.9447	SAMARI MOSQUEE	DEC28	N30	SAM
45	2°16.16	13°56.68	2.2693	13.9447	SAMARI MOSQUEE	95-61	NI7	SAM
46	2°9.66	13°54.77	2.1610	13.9128	SISAN TONDI ENC	AVK05	N31	SIS
47	2°9.97	13°55.32	2.1661	13.9220	SISAN TONDI K.T	96EB	N32	SIK
48	1°58.84	13°52.17	1.9807	13.8695	TERA BOYEY TOND	96DF	N33	TER
49	2°14.38	13°36.92	2.2397	13.6154	WARI ECOLE	AVI02	N34	WAR
50	2°14.65	13°37.35	2.2441	13.6225	WARI PASTORAL	AVI03	N35	WAP
51	2°14.65	13°37.35	2.2441	13.6225	WARI PASTORAL	JAN14	NI8	WAR
52	2°0.94	13°45.52	2.0157	13.7586	ZEIBANE FITI KO	96DG	N36	ZEI
53	2°11.84	13°52.08	2.1973	13.8680	ZIMBA	DEC31	N37	ZIM

Enreg. N°	xlon	ylat	lon	lat	village	refere	ref	vil
1	2° 8.40	13° 49.00	2.1400	13.8167	GOUNOU BANGO	F2 96GB	SK	GOU
2	2° 13.33	14° 7.41	2.2222	14.1235	KANDA	CT2 JD967	S1	KAN
3	2° 10.88	13° 52.30	2.1813	13.8716	KAREY BANGOU	LO 95-29	SI1	KAR
4	2° 10.88	13° 52.30	2.1813	13.8716	KAREY BANGOU	LO AVK14	S2	KAR
5	2° 10.88	13° 52.30	2.1813	13.8716	KAREY BANGOU	LO DEC32	S3	KAR
6	2° 10.88	13° 52.30	2.1813	13.8716	KAREY BANGOU	LO MAR01	SI2	KAR
7	2° 15.54	13° 46.80	2.2590	13.7800	LABOU TITILLO	F1 96GI	P1	LAB
8	2° 15.59	13° 46.98	2.2598	13.7830	LABOU TITILLO	F2 96FB	SOO	LAB
9	2° 11.53	13° 42.94	2.1921	13.7157	LAWEY FORAGE	96GH	SO	LAW
10	2° 0.65	13° 59.51	2.0108	13.9918	NIABERI KOU	CT2 JD961	P2	NIA
11	2° 13.82	13° 57.74	2.2303	13.9623	SAMARI KAINA	PF 96GA	P3	SAK
12	2° 15.04	13° 56.13	2.2507	13.9355	SAMARI MAISOS	F 96GF	P4	SAM
13	2° 15.92	13° 54.36	2.2654	13.9060	SISAN MAOUREY	F 96FD	P5	SIS
14	2° 15.93	13° 54.36	2.2655	13.9060	SISAN MAOUR.	CT2 JD969	P6	SIS
15	2° 11.65	13° 52.04	2.1942	13.8673	ZIMBA	CT203	S4	ZIM
16	2° 11.40	13° 52.20	2.1900	13.8700	ZIMBA FORAGE	96GD	S5	ZIM
17	2° 33.18	14° 00.78	2.5530	14.0130	GUIRBEYE	JUL95	SI1	GUI

# **ANNEXE V**

LON	LAT	PIEZ	VIL VILLAGE	NIVEL	ALT
2.0257	13.9767	212.24	BAN BANNEY KAINA	0.00	228.00
1.9959	13.6062	211.90	BAG BANGOULA MOSQUEE	225.77	225.77
2.3112	13.5455	202.22	BAR BARKIAWAL VILLAGE	220.22	220.22
2.1813	13.6922	192.48	BAK BARKIAWEL	0.00	201.00
2.0960	13.6219	201.51	BAA BARKIRE ALIDOU	208.91	208.91
2.1392	13.8906	205.89	BOU BOUBOUREY FANDOU	0.00	236.00
1.9772	13.8448	204.24	BOT BOYEY TONDI	226.39	215.00
2.2415	13.8984	197.34	BOY BOYEY TONDI ENCLOS	211.78	211.78
2.0089	13.7943	211.24	DAN DANGUEY GOROU	0.00	246.00
2.3113	13.6862	203.51	DEY DEY TEGUI	229.19	229.19
2.0167	13.6914	209.06	DIN DINKI	0.00	264.00
2.0752	13.8637	211.85	DIO DIOLE GOUBE KOUARA	239.57	239.57
2.2984	13.7723	197.90	GAD GADABO	0.00	220.00
2.3264	13.7723	197.53	GAF GADABO FETOKADIE	0.00	225.00
2.2633	13.8347	195.05	GAR GARDAMA KOUARA 1	0.00	217.00
2.0172	13.9440	209.71	GAT GATA KOUARA (K TEG	0.00	219.00
2.0371	13.8364	191.54	GOR GOROU GOUSSA	238.84	238.84
2.0858	13.8587	208.80	GOB GOUBE MENASARA	0.00	231.00
2.1091	13.8958	206.97	GKF GOUBEY KIRE FED	0.00	240.00
2.0960	13.9012	209.35	GKV GOUBEY KIRE VIL	245.05	245.05
2.1429	13.8155	199.22	GOU GOUNOU BANGOU	234.06	234.06
2.0087	13.9362	209.50	KKC KANO KOUARA CLOS	0.00	221.00
2.0093	13.9392	192.54	KKO KANO KOUARA OFEDES	219.13	218.00
2.1773	13.8861	204.46	KAR KAREY BANGOU FED	244.83	244.83
2.2493	13.5383	186.15	KOG KOGOROU	0.00	204.00
2.2084	13.7031	183.91	KOK KOKIRE	208.14	209.20
2.0987	13.7478	196.40	KON KONE BERI	206.45	206.45
2.0988	13.6984	195.68	KOK KONE KAINA ECOLE	210.26	210.26
2.1140	13.7052	193.61	KOK KONE KAINA EST ROU	226.75	226.75
2.2115	13.6015	192.33	KOF KONGOU FANDIZEY	0.00	195.00
2.0881	13.6978	195.67	KOU KOUARE KAINA MENTO	0.00	225.00
2.1948	13.7120	190.60	LAW LAWEY	199.25	201.00
2.2493	13.8931	195.92	LIB LIBO ATOU KOUARA 1	0.00	217.00
2.2123	13.7318	186.05	MAY MAYAKI KOUARA	0.00	198.00
2.2185	13.9105	196.64	MOR MORA KOUARA	248.59	250.00
2.0997	13.7887	201.41	MOU MOUSSA DIOLO ROUTE	215.15	216.00
2.0120	13.9913	209.61	NIA NIABERI KOUARA	0.00	227.00
2.1183	13.8823	208.87	OUA OUAGINI BANGOU	0.00	237.00
2.3298	13.9154	193.90	OUR OURA TONDI CHLOE	240.84	240.84
2.1772	13.5282	193.26	POS POSTEPOLICE NIAMEY	225.34	225.34
2.0063	13.9257	191.50	SAB SABON GARI TR CIM	0.00	226.00
2.2097	13.5372	192.71	SAG SAGA GOROU	0.00	215.00
2.2659	13.9456	198.61	SAM SAMARI KORY	214.69	214.69
2.1610	13.9128	208.13	SIS SISAN TONDI ENCLOS	250.76	250.76
2.1661	13.9220	203.68	SIK SISAN TONDI KOUARA	0.00	260.00
2.1312	13.7569	195.02	TCN TCHANGAREY NORD	240.41	240.41
2.1252	13.7468	196.58	TCS TCHANGAREY SUD	0.00	238.00
2.1635	13.6623	191.70	TEB TEBONSE	200.92	200.92
1.9807	13.8695	195.72	TER TERA BOYEY TONDI	0.00	235.00
2.2157	13.7475	189.11	FAD FADA TOKOBINKANI Z	194.90	199.00
2.2698	13.7678	193.47	TON TONDI GAMEY	208.32	208.32
2.0275	13.9656	208.01	TOM TONDI MEKIREY	228.19	228.19
2.2439	13.6225	189.01	WAP WARI PASTORAL	213.78	213.78
2.2397	13.6154	187.24	WAE WARI ECOLE KONGOU	0.00	209.00
2.2435	13.7693	190.98	YET YETE KOUARA	0.00	204.00
2.0407	13.8249	192.15	ZAR ZARMAKOY KOUARA	0.00	232.00
2.0157	13.7586	209.08	ZEI ZEIBANE FITI KORY	249.77	249.77
2.1973	13.8680	198.25	ZIM ZIMBA	0.00	235.00

Enreg. N°	lon	lat	xlon	ylat	village	vil	alt500
1	2.3222	13.8125	2.19.20	13.48.45	BABA_KAINA_K.	BAB	242.00
2	2.3097	13.5444	2.18.35	13.32.40	BARKIAWAL_BERI	BAR	224.00
3	2.2333	13.7694	2.14.00	13.46.10	DAREYGOROU_BRAH	DAR	231.00
4	2.2056	13.9944	2.12.20	13.59.40	DELITONDIATOUK.	DEL	238.00
5	2.3111	13.6875	2.18.40	13.41.15	DEY_TEGUI_2	DEY	235.00
6	2.2167	13.7458	2.13.00	13.44.45	FADA	FAD	205.00
7	2.2611	13.8389	2.15.40	13.50.20	GARDAMA_K.2	GAR	218.89
8	2.1417	13.8167	2.08.30	13.49.00	GOUNOU_BANGOU1	GOU	235.00
9	2.1639	13.8458	2.09.50	13.50.45	KAHLEN_GOROU	KAH	254.00
10	2.0958	13.7472	2.05.45	13.44.50	KONE_BERI	KON	225.00
11	2.2611	13.7833	2.15.40	13.47.00	LABOUTITILOUA1	LAB	217.00
12	2.1944	13.7111	2.11.40	13.42.40	LAWEY	LAW	215.21
13	2.0028	13.9250	2.00.10	13.55.30	SABON GARI	SAB	224.00
14	2.2500	13.9333	2.15.00	13.56.00	SAMARI MAISOSSO	SA	218.00
15	2.2472	13.8083	2.14.50	13.48.30	SEFO	SEF	230.00
16	2.2722	13.7667	2.16.20	13.46.00	TONDI_GAMEY_B2	TON	214.98
17	2.2444	13.6194	2.14.40	13.37.10	WARI	WAR	212.00
18	2.2444	13.7694	2.14.40	13.46.10	YETE_KOUARA	YET	204.00
19	2.1944	13.8667	2.11.40	13.52.00	ZIMBA	ZIM	233.00
20	2.1722	13.7550	2.10.20	13.45.18	ZORI_BANGOU	ZOR	265.00
21	2.1781	13.8716	2.10.41	13.52.18	KAREY_BANGOU TR	KAR	247.60
22	2.2710	13.9423	2.16.16	13.56.54	SAMARI-3	SAM	215.00
23	2.1748	13.8453	2.09.53	13.50.73	KANCHI_BANGOU	KAN	260.00