

# Campagne de nivellement GPS



Région de Diffa et lac Tchad, Niger  
nov.-déc. 2003



# Campagne de nivellement GPS dans la région de Diffa et du lac Tchad

## Rapport de mission

F. Delclaux, UMR HydroSciences Montpellier

E-mail : delclaux@msem.univ-montp2.fr

## I. Introduction

### I.1. Contexte

Dans le cadre du programme ECCO " Impact de la variabilité climatique et des activités anthropiques sur le fonctionnement hydrologique du Bassin du lac Tchad " (Favreau, 2003), la modélisation de la dynamique de l'aquifère quaternaire au sud-est du Niger (Figures 1 et 2) à l'échelle saisonnière et pluri-annuelle implique l'analyse des flux et des processus entre les différentes entités hydrologiques de la région, la nappe phréatique, le lac Tchad et la Komadougou Yobé. La première étape de cette étude nécessite non seulement le suivi des niveaux d'eau dans les puits, le lac et la rivière, mais également la détermination d'une référence altimétrique commune et précise permettant une comparaison cohérente des niveaux d'eau ainsi que le calcul de différents gradients hydrauliques.

Cette mission s'inscrit dans une collaboration étroite avec la Direction de l'Hydraulique de la région de Diffa. L'accueil par le Directeur de la DRH, M. Moussa Mamane, nous a assuré d'excellentes conditions de travail à Diffa. La collaboration avec M. Lawan Habou, chef du service "Ressources en Eau", et avec M. Issa Mounkeila, ingénieur chimiste, nous a été précieuse, par leur connaissance du terrain et de l'emplacement des puits, ainsi que par leurs relations avec les villageois. Nous tenons à les remercier pour leur disponibilité.

Je tiens également à remercier M. Erik Doerflinger (ISTEEM) pour le soutien qu'il m'a apporté lors du dépouillement et du traitement des données à Montpellier. Ses conseils et le temps qu'il a bien voulu me consacrer m'ont permis d'avoir une vue critique sur les résultats, et également d'étoffer mes connaissances de base en géodésie.

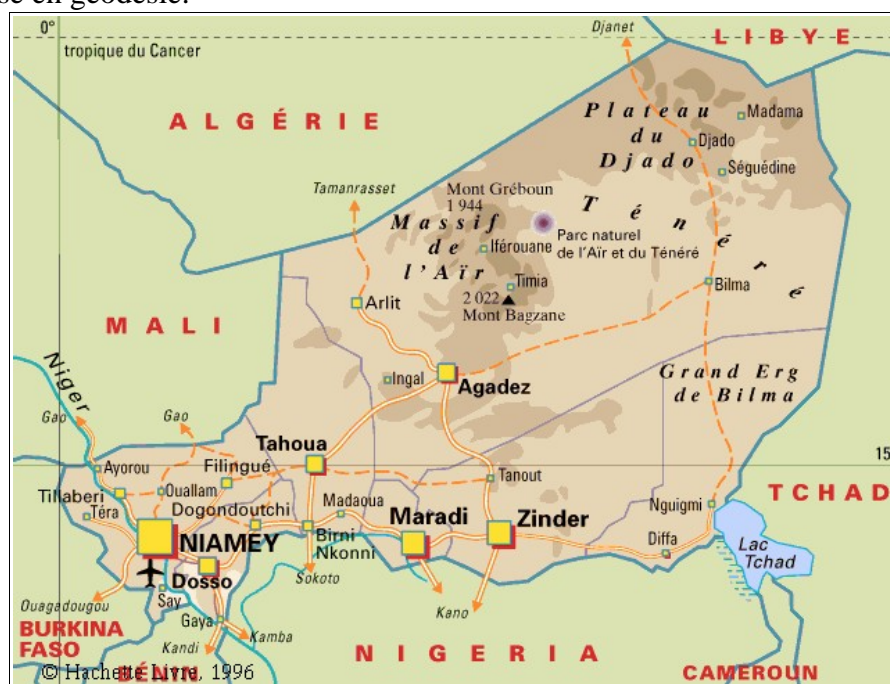


Figure 1 : Carte générale du Niger (Mevhysa, 2000)

## I.2. Objectifs

Compte tenu de l'imprécision des courbes de niveau disponibles sur la carte 1:200000 (IGN, 1962), et de la rareté des bornes altimétriques, le procédé le plus efficace et le plus précis pour référencer les margelles des puits est basé sur la méthode GPS différentiel (Favre, 2000a et 2000b) : une station GPS de référence est installée sur un repère altimétrique connu, tandis qu'une acquisition par GPS itinérant est réalisée sur les margelles des puits et sur les tubes de piézomètres. Cette méthode est d'autant plus adaptée à cette région que le couvert végétal est faible et le relief peu accidenté, permettant ainsi une bonne visibilité par un nombre important de satellites (6 à 7). La précision finale attendue est de l'ordre de 5 cm.

La mission s'est articulée selon les objectifs suivants :

- sélection, à partir de la carte IGN (IGN, 1962) et des feuille de relevés (IGN, 1958), des bornes altimétriques disponibles ;
- recherche sur le terrain des bornes en bon état et réellement opérationnelles ;
- installation d'une ou deux stations GPS de référence à proximité des bornes ;
- acquisition de données GPS sur les puits et piézomètres dans la zone concernée (30 à 40 km autour des stations de référence) ;
- traitement des données et détermination de la ligne de base GPS-référence/GPS-puits ;

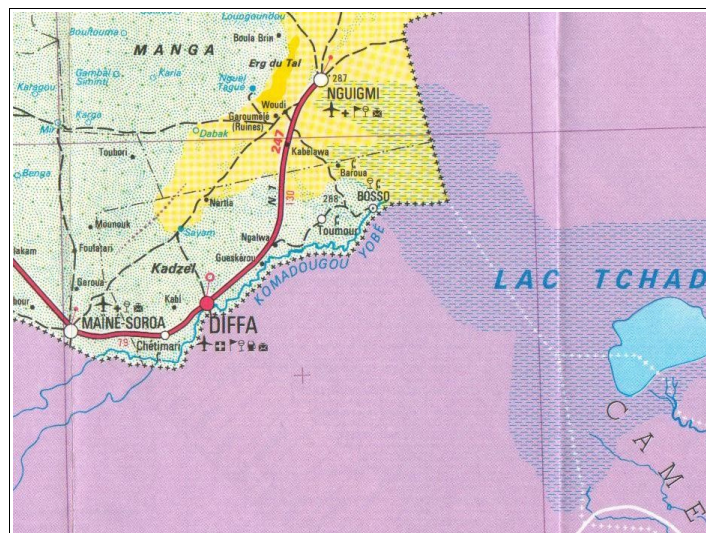


Figure 2 : zone d'étude, région de Diffa (IGN 1993)

## II. Méthodologie

### II.1. Principe du GPS différentiel

Une mesure GPS est basée sur le calcul de la distance de l'antenne du récepteur à un satellite dont la position est connue. Quatre variables sont à calculer (x, y, z, t), ce qui nécessite l'acquisition simultanée d'au moins 4 satellites. L'altitude z est calculée par rapport à l'ellipsoïde WGS84. L'utilisation d'un seul récepteur GPS (mode absolu) est donc théoriquement suffisante pour connaître les coordonnées d'un point. Cependant cette configuration conduit à une précision de l'ordre de 10 m en planimétrie et 20 à 30 m en altimétrie quelque soit le GPS (Figure 4). Cette précision peut s'améliorer sur une durée d'acquisition de plusieurs heures, mais ne descendra pas en dessous de 5 m en altimétrie. Il est possible d'améliorer la précision en utilisant des GPS bi-fréquence, et en travaillant en mode différentiel : l'utilisation de deux GPS ou plus diminue les erreurs communes aux récepteurs, la cause principale d'erreur étant la traversée

du signal dans la troposphère (Figure 3). Il faut alors que les récepteurs GPS travaillent avec les mêmes satellites. Dans ces conditions, le système fournit un vecteur de base avec une très bonne précision, qui peut atteindre 5 cm en altimétrie pour une heure d'acquisition. La transformation en altitude absolue nécessite la connaissance de la cote  $z$  de l'antenne de référence (point nivelé, réseau de référence GPS, etc.).

Les altitudes des bornes altimétriques que nous avons utilisé au Niger sont exprimées en mètres au dessus du niveau moyen de la mer à Dakar. Quant à la précision, selon Samuel Branchu de l'IGN, l'écart type des mesures de nivellement est de l'ordre de 1,5 mm.

## **II.2. Méthodologie et matériel**

N'étant pas spécialistes de la géodésie, nous nous sommes appuyés sur les conseils d'Eric Doerflinger (ISTEEM Montpellier) et d'Olivier Charade (IPGP Paris), ainsi que sur les carnets de route de Cyril Favre (Favre, 2000a) relatant une expérience similaire au Niger.

Afin de nous préserver au maximum de pannes éventuelles sur les antennes, récepteurs et batteries, et d'erreurs sur les nivellements optiques, nous avons choisi de doubler le matériel d'acquisition sur les références : en effet, une erreur sur le nivellement d'un puits ne concerne que le puits, alors qu'un problème sur une station de référence met en cause l'ensemble des acquisitions d'une journée. Nous avons donc, pour chaque jour de mesure, deux récepteurs fixes sur deux références distinctes (huit heures d'acquisition en moyenne) et un récepteur itinérant pour les puits et piézomètres (45 mn d'acquisition).

Le matériel utilisé appartient au parc INSU, géré par Olivier Charade à l'IPGP. Il était composé de trois récepteurs bi-fréquence GPS Ashtech (modèles Z12LP, Z12CGRS et ZX), associés à des antennes Ashtech Geodetic 2 et Geodetic 4. Le transfert des données sur PC portable, également prêté par l'INSU, était assuré par les logiciels remote (Z12LP), cgreremote (Z12CGRS) et download32 (ZX). Le poids total de ce matériel était de 60 Kg.

Le stockage des données était assuré par un PC portable. Nous n'avons malheureusement pas pu traiter les données au cours de la mission car, suite à un malentendu lors de la réservation du matériel, la clef du logiciel de traitement Ashtech Solution ne nous a pas été fournie avant le départ. Le calcul des lignes de base a donc été effectué à Montpellier.

Enfin, ce matériel lourd était complété sur le terrain par des GPS de poche de marque Garmin, ainsi qu'un appareil photo numérique.

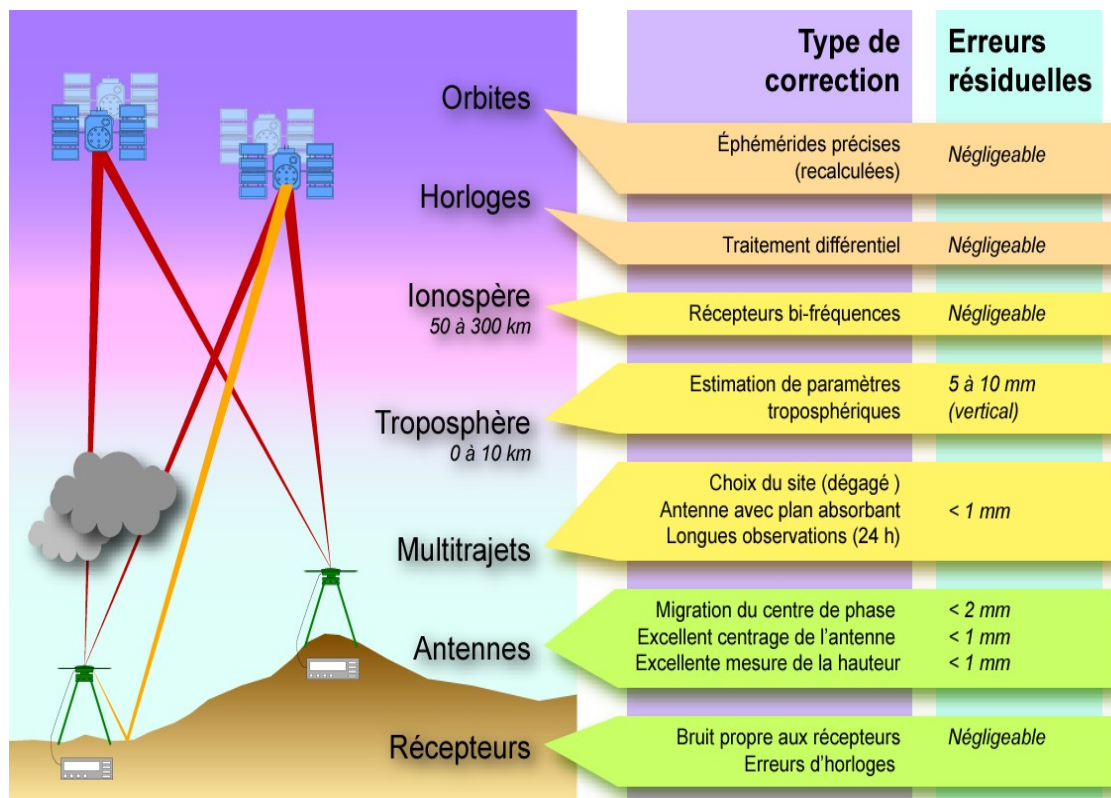


Figure 3 : Différentes sources d'erreur affectant les mesures GPS (Doerflinger, 2001)

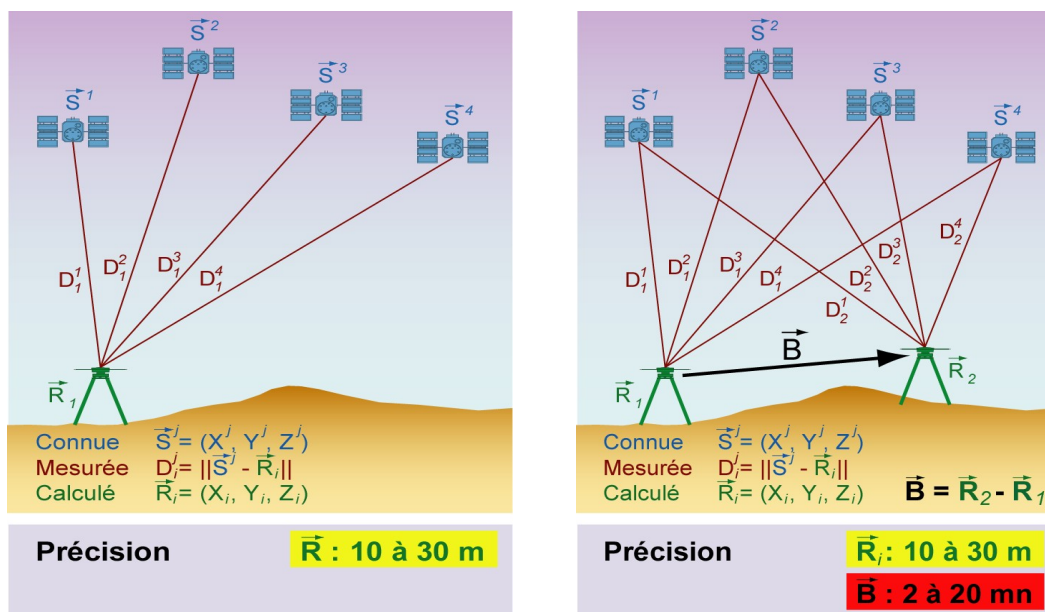


Figure 4 : Précision des modes de positionnement a) absolu b) différentiel (Doerflinger, 2001)

### III. Déroulement de la mission

#### III.1. Chronologie

- *21 novembre 2003* : départ de Montpellier avec Guillaume Favreau, arrivée à Niamey ;
- *22-23 novembre* : préparation du matériel à l'IRD Niamey avec Abdulaye Koné, technicien hydrologue et Abdulaye Oumarou, chauffeur mécanicien ;
- *24-25 novembre* : trajet Niamey-Diffa via Dosso, Maradi et Zinder (1500 km) ;
- *26 novembre* : réunions de travail à la Direction Régionale de l'Hydraulique (DRH) de Diffa avec Moussa Mamane, Directeur de la DRH Diffa, Lawan Habou, chef du service "Ressources en Eau", et Issa Mounkeila, ingénieur chimiste ; première reconnaissance des stations de référence altimétriques à l'ouest de Diffa ;
- *27 novembre*: installation des GPS de référence à Diffa (école) et Chétimari (école) ; acquisition GPS aux puits de Malam Gamari et Kakaya Kyari ; entretien avec Oumarou Yacouba, préfet de la région de Diffa, et Moussa Mamane ;
- *28 novembre* : installation des GPS de référence à Diffa (école) et Chétimari (école) ; acquisition GPS aux puits de Bagara pépinière, Tourban Guida, Djori Koulo et Djori Koulo Moderi ; entretien avec le chef de canton de Chetimari ;
- *29 novembre* : reconnaissance de bornes IGN dans la région de Geskerou ; mise en forme et sauvegarde des données GPS et de nivellement optique ; entretien du matériel et des batteries ;préparation du planning des journées suivantes ;
- *30 novembre* : installation des GPS de référence à Geskerou et Bagé (école) ; nivellement optique des puits de Geskerou dispensaire et de Bagé ; acquisition GPS sur le puits de Kosseyri et le piézomètre de Likitiré ;
- *1-2 décembre* : installation des GPS de référence à Bagé (école) et sur la borne IGN R22 (entre Bagé et Bosso) ; acquisition GPS sur les piézomètres de Kosseyri, Kaola Djima, Kolomanga, et sur les puits de Arikoukouri, Baroua Gana (Tchougoundi), Tchoukoudjani, Touboram, et Yeroua Gana ; hébergement dans la case de santé de Bagé ;
- *3 décembre* : mise en forme et sauvegarde des données GPS et de nivellement optique ; entretien du matériel et des batteries ; préparation du planning des journées suivantes ;
- *4 décembre* : installation des GPS de référence à Gremari et Maïné-Soroa (sous-préfecture) ; entretien avec le directeur du cabinet du sous-préfet ; acquisition GPS sur les puits de Maïné-Soroa 1 et 2 ;
- *5 décembre* : installation des GPS de référence à Gremari et Maïné-Soroa (sous-préfecture) ; acquisition GPS sur les puits de Gremari, de Goursoungoumiram, de N'Gourmari et de l'échelle limnimétrique de Chefouri sur la Komadougou ;
- *6 décembre* : installation des GPS de référence à Gremari et Maïné-Soroa (sous-préfecture) ; acquisition GPS sur les puits de Lawandi et Tatakoutou, ainsi que sur 6 points le long d'un transect Ouest-Est sur la rive supposée du méga-Tchad ;
- *7 décembre* : mise en forme et sauvegarde des données GPS et de nivellement optique ; entretien du matériel et des batteries ; préparation du planning des journées suivantes ;
- *8 décembre* : installation des GPS de référence à Gremari et Chetimari ; nivellement optique du puits de Chetimari ; acquisition GPS du puits de N'Gibiri, de Marigidi et de Douro ;
- *9 décembre* : journée de reconnaissance vers le lac Tchad aux villages de Bosso, Mamouri et Adi Maradi ; hébergement chez le chef de canton de Bosso ;

- *10 décembre* : installation d'un GPS de référence à Mamouri ; acquisition GPS à l'échelle limnimétrique de Mamouri (Komadougou) ; acquisition GPS du niveau du lac Tchad ; installation d'une échelle limnimétrique à Adi Maradi (lac Tchad) et acquisition GPS ;
- *11 décembre* : mise en forme et sauvegarde des données GPS et de nivellement optique ; entretien du matériel ; préparation du retour sur Niamey ;
- *12-13 décembre* : retour sur Niamey, avec des voitures quelque peu souffrantes ;
- *14-15 décembre* : rangement du matériel, sauvegarde des données et archivage des photos
- *16 décembre* : départ de Niamey, arrivée à Montpellier ;

Le Tableau 1 synthétise la chronologie des opérations de nivellement.

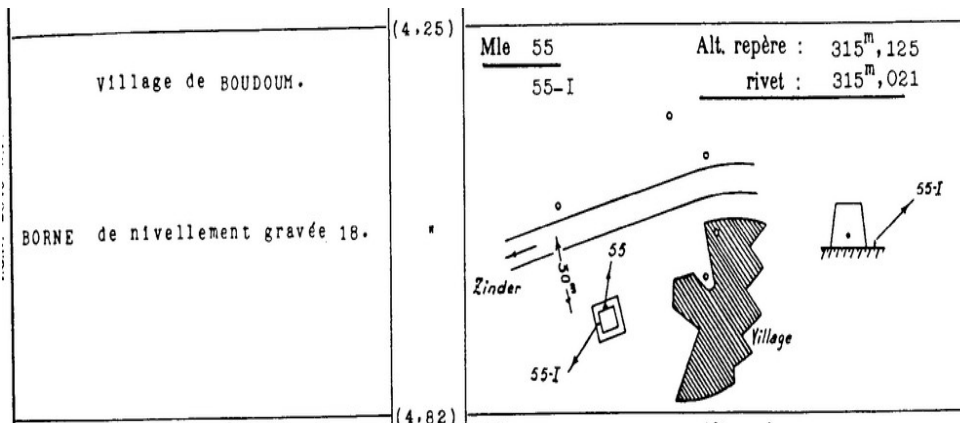
Ainsi, 39 acquisitions de données GPS sur des puits, piézomètres et échelles ont été réalisées pendant ces 15 jours, complétées par 19 mesures GPS sur les stations de référence. Le nombre moyen d'acquisitions par jour est identique à celui de la mission de Cyril Favre (Favre, 2000a), soit 4 par jour. Ce nombre peut sembler faible par rapport à la durée moyenne d'une acquisition (1h). De fait, une partie importante du travail a consisté en déplacements (2000 km de piste), repérage des bornes, gestion et entretien du matériel, archivage et sauvegarde des données.

| Date    | Jour | Village/Lieu          | Type     | Code          | Lat. Nord   | Long. Est   | Zr       | Recepteur,    | Code     |
|---------|------|-----------------------|----------|---------------|-------------|-------------|----------|---------------|----------|
|         | GPS  |                       |          | GPS           | deg mn sec  | deg mn sec  | Réf. IGN | Antenne       | IRH GPS  |
| ###     | 331  | Difa                  |          | réf. IGN RDIF | 13 19 1,58  | 12 36 41,97 | 304,044  | Z12lp, Geo2   |          |
| ###     | 331  | Chetimari             |          | réf. IGN RCHE | 13 11 10,20 | 12 25 20,25 | 308,895  | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 27/nov. | 331  | Kakaya Kyari          | puits    | PKAK          | 13 22 33,59 | 12 28 1,13  |          | Zx, Geo4      |          |
| 27/nov. | 331  | Malam Gamari          | puits    | PMAL          | 13 18 55,34 | 12 31 38,87 |          | Zx, Geo4      | 15983 2  |
| ###     | 332  | Difa                  |          | réf. IGN RDIF | 13 19 1,58  | 12 36 41,97 | 304,044  | Z12lp, Geo2   |          |
| ###     | 332  | Chetimari             |          | réf. IGN RCHE | 13 11 10,29 | 12 25 20,12 | 308,895  | Zx, Geo4      |          |
| 28/nov. | 332  | Bagara pépinière      | puits    | PBAG          | 13 17 32,33 | 12 35 28,63 |          | Z12cgrs, Geo2 | 6        |
| 28/nov. | 332  | Tourban guida         | puits    | PTOU          | 13 16 29,18 | 12 34 20,95 |          | Z12cgrs, Geo2 | 40128 5  |
| 28/nov. | 332  | Djori koulo 1         | puits    | PDJ1          | 13 18 45,45 | 12 33 29,28 |          | Z12cgrs, Geo2 | 14265 3  |
| 28/nov. | 332  | Djori koulo 2 Moderi  | puits    | PDJ2          | 13 18 1,76  | 12 33 11,88 |          | Z12cgrs, Geo2 | 4        |
| ###     | 334  | Geskerou              |          | réf. IGN RGES | 13 29 10,90 | 12 50 34,60 | 297,319  | Z12lp, Geo2   |          |
| ###     | 334  | Bagé                  |          | réf. IGN RBAG | 13 36 59,40 | 13 3 16,60  | 292,226  | Zx, Geo4      |          |
| 30/nov. | 334  | Kosseyri              | puits    | PKOS          | 13 45 45,10 | 12 48 20,70 |          | Z12cgrs, Geo2 | 8        |
| 30/nov. | 334  | Likité                | piezo    | ZLIK          | 13 35 19,14 | 12 54 2,34  |          | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 30/nov. | 334  | Geskerou dispensaire  | puits    |               | 13 29 5,00  | 12 50 33,00 | 297,319  |               | 40157    |
| 30/nov. | 334  | Bagé puits            | puits    |               |             |             | 292,226  |               |          |
| 01/déc. | 335  | Bagé                  |          | réf. IGN RBAG | 13 37 0,32  | 13 3 16,20  | 292,226  | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 01/déc. | 335  | Borne n° 22           |          | réf. IGN R22  | 13 40 2,46  | 13 14 5,96  | 286,792  | Zx, Geo4      |          |
| 01/déc. | 335  | Kosseyri              | Piezo    | ZKOS          | 13 44 30,23 | 12 49 8,20  |          | Z12lp, Geo2   | 9        |
| 01/déc. | 335  | Kaola Djima           | piezo    | ZKAO          | 13 47 45,30 | 12 52 13,35 |          | Z12lp, Geo2   | 10       |
| 01/déc. | 335  | Kolomanga             | piezo    | ZKOL          | 13 53 26,97 | 12 58 45,25 |          | Z12lp, Geo2   | 11       |
| 01/déc. | 335  | Ari Koukouri          | puits    | PARI          | 13 56 14,85 | 13 6 36,00  |          | Z12lp, Geo2   | 12       |
| 02/déc. | 336  | Bagé                  |          | réf. IGN RBAG | 13 37 0,32  | 13 3 16,20  | 292,226  | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 02/déc. | 336  | Borne n° 22           |          | réf. IGN R22  | 13 40 2,46  | 13 14 6,02  | 286,792  | Zx, Geo4      |          |
| 02/déc. | 336  | Baroua Gana Tchougour | puits    | PBAR          | 13 54 32,06 | 13 8 36,46  |          | Z12lp, Geo2   | 22604    |
| 02/déc. | 336  | Tchoukoudjani         | puits    | PTCH          | 13 50 26,70 | 13 12 6,09  |          | Z12lp, Geo2   | 14299 14 |
| 02/déc. | 336  | Touboram              | puits    | PTOU          | 13 46 39,40 | 13 14 20,50 |          | Z12lp, Geo2   | 14301 16 |
| 02/déc. | 336  | Yeroua Gana Founari   | puits    | PYER          | 13 48 0,19  | 13 14 12,09 |          | Z12lp, Geo2   | 22609 15 |
| 04/déc. | 338  | Gremari               |          | réf. IGN RGRE | 13 8 43,54  | 12 10 12,09 | 317,640  | Zx, Geo4      |          |
| 04/déc. | 338  | Mainé Soroa préf.     |          | réf. IGN RMAI | 13 12 55,93 | 12 1 41,60  | 334,833  | Z12lp, Geo2   |          |
| 04/déc. | 338  | Mainé Soara 1 école   | puits    | PMA1          | 13 13 28,86 | 12 1 31,38  |          | Z12cgrs, Geo2 | 40213 17 |
| 04/déc. | 338  | Mainé Soara 2         | puits    | PMA2          | 13 13 24,42 | 12 1 36,99  |          | Z12cgrs, Geo2 | 14274    |
| 05/déc. | 339  | Gremari               |          | réf. IGN RGRE | 13 8 43,58  | 12 10 12,10 | 317,640  | Zx, Geo4      |          |
| 05/déc. | 339  | Mainé Soroa préf.     |          | réf. IGN RMAI | 13 12 55,99 | 12 1 41,60  | 334,833  | Z12lp, Geo2   |          |
| 05/déc. | 339  | Gremari puits         | puits    | PGRE          | 13 8 32,97  | 12 10 7,75  |          | Z12cgrs, Geo2 | 22616    |
| 05/déc. | 339  | Goursoungoumiram      | puits    | PGOU          | 13 9 34,21  | 12 4 46,42  |          | Z12cgrs, Geo2 | 40169 20 |
| 05/déc. | 339  | N'Goumari             | puits    | PNGO          | 13 16 44,00 | 12 1 7,64   |          | Z12cgrs, Geo2 | 22619 21 |
| 05/déc. | 339  | Chefourri Z(2m)       | échelle  | ECHE          | 13 7 27,30  | 12 12 31,77 |          | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 06/déc. | 340  | Gremari               |          | réf. IGN RGRE | 13 8 43,58  | 12 10 12,08 | 317,640  | Zx, Geo4      |          |
| 06/déc. | 340  | Mainé Soroa préf.     |          | réf. IGN RMAI | 13 12 55,99 | 12 1 41,60  | 334,833  | Z12lp, Geo2   |          |
| 06/déc. | 340  | Lawandi               | puits    | PLAW          | 13 21 16,25 | 12 3 56,10  |          | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 06/déc. | 340  | Tatakoutou            | puits    | PTAT          | 13 30 56,29 | 12 8 13,12  |          | Z12cgrs, Geo2 | 22621 23 |
| 06/déc. | 340  | Point 1               | transect | T1P1          | 13 31 35,21 | 12 5 46,57  |          | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 06/déc. | 340  | Point 2               | transect | T1P2          | 13 30 56,75 | 12 7 19,34  |          | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 06/déc. | 340  | Point 3               | transect | PTAT          | 13 30 56,10 | 12 8 12,60  |          | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 06/déc. | 340  | Point 4               | transect | T1P4          | 13 30 16,61 | 12 8 53,31  |          | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 06/déc. | 340  | Point 5               | transect | T1P5          | 13 29 53,59 | 12 9 14,84  |          | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 06/déc. | 340  | Point 6               | transect | T1P6          | 13 27 28,31 | 12 11 18,08 |          | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 08/déc. | 342  | Chetimari             |          | réf. IGN RCHE | 13 11 10,20 | 12 25 20,30 | 308,895  | Z12cgrs, Geo2 |          |
| 08/déc. | 342  | Gremari               |          | réf. IGN RGRE | 13 8 43,63  | 12 10 12,12 | 317,640  | Zx, Geo4      |          |
| 08/déc. | 342  | Chétimari puits       | puits    |               | 13 11 13,10 | 12 25 23,20 | 308,895  |               | 24       |
| 08/déc. | 342  | N'Gibiri              | puits    | PNGI          | 13 14 14,51 | 12 16 11,08 |          | Z12lp, Geo2   | 22589    |
| 08/déc. | 342  | Marigidi              | puits    | PMAR          | 13 8 0,33   | 12 18 4,72  |          | Z12lp, Geo2   | 22617    |
| 08/déc. | 342  | Douro                 | puits    | PDOU          | 13 5 10,69  | 12 24 58,30 |          | Z12lp, Geo2   | 22590 25 |

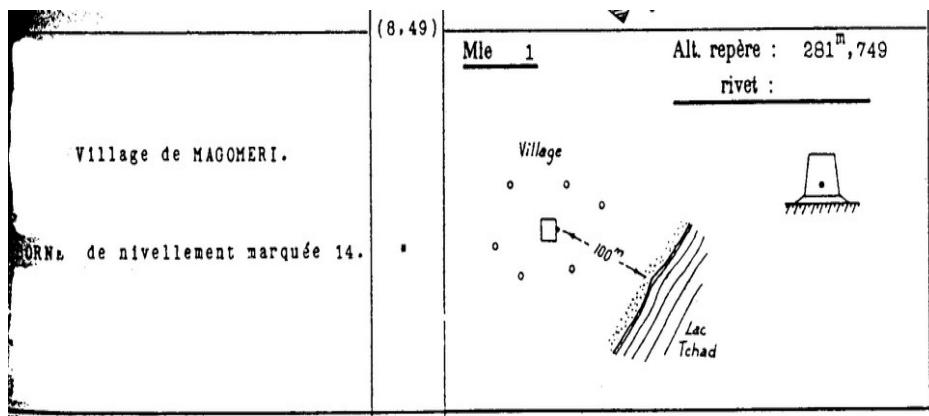
Tableau 1 : liste chronologique des acquisitions GPS et des nivellements. Les coordonnées sont celles des antennes. En rouge : stations de référence ; en bleu : puits ; en noir : piézomètres et points topographiques ; en vert : échelles limnimétriques.

### III.2. Repérage des bornes de nivellement

Le réseau de nivellement existant dans cette région du Niger est celui réalisé par l'IGN à la fin des années 1950. Depuis, il a été peu entretenu, d'autant que les routes, pistes et villages sur lesquels s'appuyait le réseau se sont parfois transformés et déplacés. Ainsi, entre Maïné Soroa et Diffa, les bornes qui jouxtaient la route principale se trouvent maintenant en pleine brousse, à quelques kilomètres du goudron actuel (cf. Figure 5a). De même, le recul du lac Tchad a profondément modifié le paysage : ainsi, la borne du village de Mamouri (anciennement Magomeri), qui se trouvait à 100 m du rivage selon le répertoire IGN se trouve actuellement à plus de 5 km du bord du lac, dans une zone boisée difficile d'accès (cf. Figure 5b). Enfin, l'érosion éolienne, et parfois l'utilisation détournée des bornes rend parfois celles-ci inutilisables (cf. Figure 6). **Par contre, les repères les plus fiables se sont avérés être les repères scellés dans les murs des écoles, car ces bâtiments n'ont généralement pas bougé depuis leur construction.**



a) village de Boudoum : la route de Zinder n'existe plus, et la borne se trouve maintenant dans l'enceinte d'une case.



b) village de Mamouri : le nom du village a changé, et le lac Tchad se trouve maintenant à plus de 5 km de la borne.

Figure 5 : évolution historique de certaines bornes telles que décrites dans les répertoires de nivellement (IGN, 1958).



*bornes déchaussées par l'érosion éolienne entre Diffa et Bosso*



*Maïne-Soroa : borne recyclée...  
conviviale*



*Boudoum : intégration de la borne  
dans le village ; problème de  
visibilité GPS)*

Figure 6 : exemples de bornes inutilisables.

Ainsi, suite aux repérages sur la carte au 1:200000 et à des enquêtes rapides dans les villages, notamment auprès des anciens, nous avons pu retrouver l'ensemble des bornes, pour lesquelles 1/3 sont réellement utilisables. (cf. photos de la Figure 7).



*Chetimari*



*Mamouri*



*Geskerou : borne (presque) déhaussée par l'érosion éolienne*



*dans les environs d'Igir*

Figure 7 : exemples de bornes utilisables

### III.3. Acquisition GPS

Les schémas de principe d'acquisition GPS sur une borne altimétrique et sur un puits (ou un piézomètre ou une échelle limnimétrique), sont représentés sur les Figures 8 et 9.

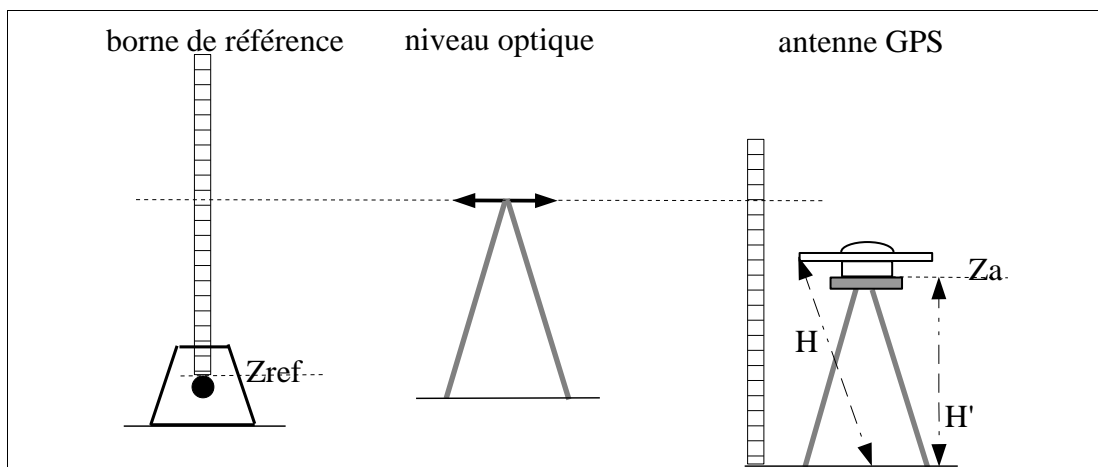


Figure 8 : acquisition GPS et détermination de l'altitude  $Z_a$  de l'antenne.

La hauteur  $H'$  est calculée à partir de la mesure  $H$  corrigée par les caractéristiques géométriques de

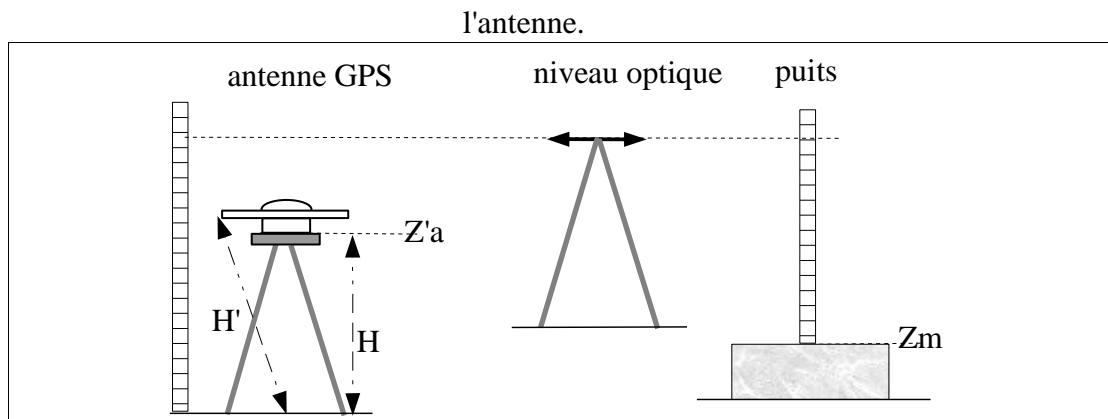


Figure 9 : acquisition GPS et détermination de l'altitude  $Z_m$  à partir la cote  $Z'a$ .

Le  $\Delta z$  différentiel entre les cotes  $Z_a$  et  $Z'a$  est donné par le calcul de la ligne de base.

L'acquisition GPS en tant que telle n'a pas posé de problèmes. La visibilité des satellites était bonne, en raison du faible couvert végétal et du relief peu accidenté. Par ailleurs, la mission ayant lieu en saison sèche, les conditions atmosphériques étaient parfaitement homogènes sur la région. Aucune panne sur les récepteurs et antennes n'est à déplorer. Les seules précautions à prendre concernaient la protection des récepteurs à la chaleur, le gardiennage du matériel pour les stations de référence ... et parfois la curiosité enthousiaste des enfants !

Les photos de la Figure 10 montrent différentes configurations d'acquisition.

## IV. Traitement des données

### IV.1. Définition du géoïde

Le problème de traitement des données GPS est principalement dû à la juxtaposition de deux systèmes de référence, le 1er propre au GPS, le 2ème dépendant du nivellement optique IGN. La Figure 11 montre les différentes hauteurs impliquées dans le calcul d'une altitude  $H$  par rapport au géoïde. En effet, c'est cette hauteur au géoïde qui nous intéresse en tant qu'hydrologue/hydrogéologue car ce sont les gradients hydrauliques par rapport à la surface d'équipotentialité de la pesanteur qui interviennent dans la dynamique de l'eau. Or ce géoïde n'est pas connu avec précision : nous y avons accès indirectement par un nivellement optique, ou directement avec un modèle de géoïde qui en est une représentation mathématique. Le modèle qui est le plus couramment utilisé, et qui est implanté dans le logiciel Ashtech, est l'EGM96 (Earth Gravity Model) : ce modèle est disponible sous la forme d'un fichier grille de 30" d'arc ( $\sim 1$  Km) contenant les écarts, ou ondulations, du géoïde par rapport à l'ellipsoïde WGS84. Les outils d'interpolation pour tout point de coordonnées (Long., Lat.) sont également disponibles. (<http://earth-info.nima.mil/GandG/wgsegm/egm84.html>)

### IV.2. Calcul de l'altitude

Dans le cadre d'une acquisition GPS en mode différentiel entre une référence (r) et un puits (p), nous

avons le système suivant :

$$hr = Hr + Nr$$

$$hp = Hp + Np$$

avec  $hr, hp$  : hauteurs GPS par rapport à l'ellipsoïde

$Hr, Hp$  : altitudes IGN

$Nr, Np$  : ondulation du géoïde "expérimental"

soit un système de 2 équations à 3 inconnues  $Hp, Nr$  et  $Np$ .



*acquisition GPS sur le piézomètre de  
Kaola Djima*



*acquisition GPS sur la margelle du puits de  
Lawandi*



*nivellement et acquisition GPS à l'échelle  
de Chefouri sur la Komadougou*



*acquisition GPS sur le sol (transect)*

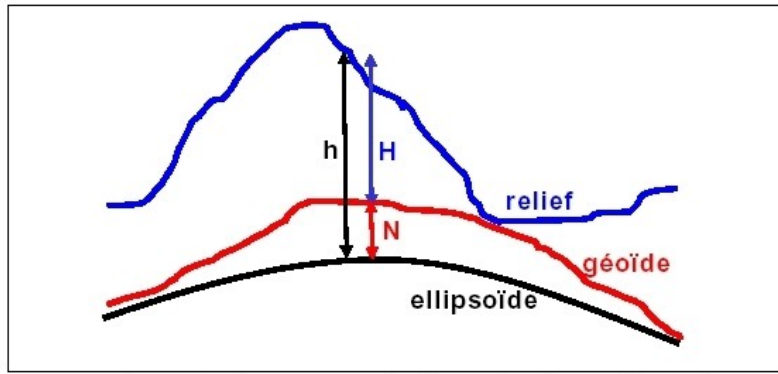


*nivellement optique à partir de la borne de  
Geskerou*



*acquisition GPS au puits de Turban Guida*

**Figure 10** : configurations d'acquisition de données GPS



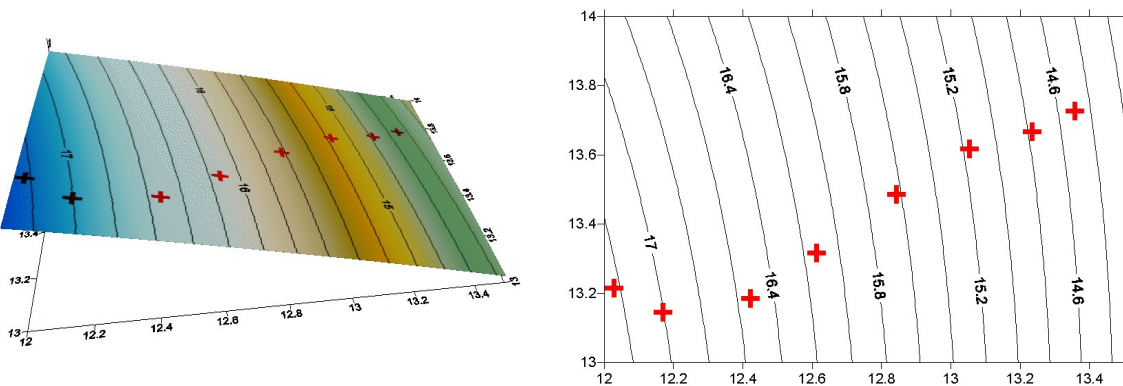
**Figure 11** : La hauteur  $h$  rapport à l'ellipsoïde (WGS84) est déterminée par GPS. L'altitude  $H$  (hauteur orthométrique) est donnée par le nivellement optique dont l'origine est le niveau moyen de la mer.  $N$  est l'ondulation du géoïde

On calcule alors  $H_p$  de la manière suivante :

$$H_p = H_r + (h_p - h_r) + (N_r - N_p)$$

La variation de hauteur de la ligne de base ( $h_p - h_r$ ) est calculée par le logiciel .

L'expression  $(N_r - N_p)$  est inconnue et exprime le gradient du géoïde "expérimental". On fait alors l'hypothèse que cette variation est proche de celle du modèle de géoïde EGM96. Nous avons alors  $(N_r - N_p) \sim (N_{mr} - N_{mp})$ , cette dernière étant connue. Cette hypothèse est en partie suggérée lorsqu'on observe la forme du modèle de géoïde EGM96 sur notre zone de travail (Figure 12). Même si la variation longitudinale totale est loin d'être négligeable (3 m), le gradient reste constant le long du transect des stations de référence.



**Figure 12** : Visualisation 3D et isovaleurs du modèle de géoïde EGM96 sur la zone de travail. Les coordonnées sont en degrés (longitude et latitude)  
Les stations de référence sont représentées par les croix rouges.

### IV.3. Résultats

Les données des altitudes aux différents points d'acquisition sont regroupés dans le Tableau 2. Elles ont été calculées en utilisant le mode orthométrique du logiciel. Le calcul s'effectue en deux étapes : 1) étape "process", ou calcul des vecteurs de base ; 2) étape "adjust" ou calcul du réseau dans le cas de deux références (deux lignes de base sur pour un seul point).

| Village/Lieu                   | Lat. Nord |    |       | Long. Est |    |       | $\Delta z$ optique<br>(m) | IC 95<br>(m) | Zm<br>(m)      | Code IRH |
|--------------------------------|-----------|----|-------|-----------|----|-------|---------------------------|--------------|----------------|----------|
|                                | deg       | mn | sec   | deg       | mn | sec   |                           |              |                |          |
| <b>Puits</b>                   |           |    |       |           |    |       |                           |              |                |          |
| Kakaya Kyari                   | 13        | 22 | 33,59 | 12        | 28 | 1,13  | 0,002                     | 0,047        | <b>302,858</b> |          |
| Malam Gamari                   | 13        | 18 | 55,34 | 12        | 31 | 38,87 | 0,002                     | 0,024        | <b>303,792</b> | 15983    |
| Bagara pépinière               | 13        | 17 | 32,33 | 12        | 35 | 28,63 | 0,000                     | 0,041        | <b>304,612</b> |          |
| Tourban guida                  | 13        | 16 | 29,18 | 12        | 34 | 20,95 | 0,001                     | 0,074        | <b>304,278</b> | 40128    |
| Djori koulo 1                  | 13        | 18 | 45,45 | 12        | 33 | 29,28 | 0,002                     | 0,056        | <b>301,508</b> | 14265    |
| Djori koulo 2 Moderi           | 13        | 18 | 1,76  | 12        | 33 | 11,88 | 0,003                     | 0,071        | <b>303,542</b> |          |
| Kosseyri                       | 13        | 45 | 45,10 | 12        | 48 | 20,70 | 0,001                     | 0,169        | <b>293,307</b> |          |
| Geskerou dispensaire           | 13        | 29 | 5,00  | 12        | 50 | 33,00 |                           |              | <b>297,319</b> | 40157    |
| Bagé puits                     |           |    |       |           |    |       |                           |              | <b>292,226</b> |          |
| Ari Koukouri                   | 13        | 56 | 14,85 | 13        | 6  | 36,00 | 0,001                     | 0,082        | <b>287,014</b> |          |
| Baroua Gana Tchougoundi        | 13        | 54 | 32,06 | 13        | 8  | 36,46 | 0,001                     | 0,115        | <b>287,351</b> | 22604    |
| Tchoukoudjani                  | 13        | 50 | 26,70 | 13        | 12 | 6,09  | 0,000                     | 0,084        | <b>288,455</b> | 14299    |
| Touboram                       | 13        | 46 | 39,40 | 13        | 14 | 20,50 | 0,000                     | 0,054        | <b>285,006</b> | 14301    |
| Yeroua Gana Founari            | 13        | 48 | 0,19  | 13        | 14 | 12,09 | 0,001                     | 0,064        | <b>282,534</b> | 22609    |
| Mainé Soara 1 école            | 13        | 13 | 28,86 | 12        | 1  | 31,38 | 0,001                     | 0,016        | <b>321,319</b> | 40213    |
| Mainé Soara 2                  | 13        | 13 | 24,42 | 12        | 1  | 36,99 | 0,001                     | 0,019        | <b>322,319</b> | 14274    |
| Gremari puits                  | 13        | 8  | 32,97 | 12        | 10 | 7,75  | 0,001                     | 0,008        | <b>318,857</b> | 22616    |
| Goursoungoumiram               | 13        | 9  | 34,21 | 12        | 4  | 46,42 | 0,003                     | 0,044        | <b>315,559</b> | 40169    |
| N'Goumari                      | 13        | 16 | 44,00 | 12        | 1  | 7,64  | 0,001                     | 0,043        | <b>317,988</b> | 22619    |
| Lawandi                        | 13        | 21 | 16,25 | 12        | 3  | 56,10 | 0,001                     | 0,057        | <b>326,048</b> |          |
| Tatakoutou                     | 13        | 30 | 56,29 | 12        | 8  | 13,12 | 0,001                     | 0,126        | <b>313,839</b> | 22621    |
| Chétimari puits                | 13        | 11 | 13,10 | 12        | 25 | 23,20 | 0,002                     |              | <b>308,895</b> |          |
| N'Gibiri                       | 13        | 14 | 14,51 | 12        | 16 | 11,08 | 0,001                     | 0,106        | <b>314,085</b> | 22589    |
| Marigidi                       | 13        | 8  | 0,33  | 12        | 18 | 4,72  | 0,001                     | 0,057        | <b>310,615</b> | 22617    |
| Douro                          | 13        | 5  | 10,69 | 12        | 24 | 58,30 | 0,000                     | 0,130        | <b>308,262</b> | 22590    |
| <b>Piézomètres</b>             |           |    |       |           |    |       |                           |              |                |          |
| Likitiré                       | 13        | 35 | 19,14 | 12        | 54 | 2,34  | 0,001                     | 0,236        | <b>296,103</b> |          |
| Kosseyri                       | 13        | 44 | 30,23 | 12        | 49 | 8,20  | 0,001                     | 0,097        | <b>291,581</b> |          |
| Kaola Djima                    | 13        | 47 | 45,30 | 12        | 52 | 13,35 | 0,001                     | 0,113        | <b>288,675</b> |          |
| Kolomanga                      | 13        | 53 | 26,97 | 12        | 58 | 45,25 | 0,001                     | 0,139        | <b>288,241</b> |          |
| <b>Échelles limnimétriques</b> |           |    |       |           |    |       |                           |              |                |          |
| Chefour Z(2m)                  | 13        | 7  | 27,30 | 12        | 12 | 31,77 | 0,000                     | 0,032        | <b>308,617</b> |          |
| Mamouri éch. Z(2m)             | 13        | 42 | 57,37 | 13        | 20 | 54,31 | 0,002                     | 0,005        | <b>280,633</b> |          |
| Adi Amaradi Z(2m)              | 13        | 44 | 44,00 | 13        | 23 | 48,44 | 0,015                     | 0,011        | <b>275,151</b> |          |
| Lac Tchad                      | 13        | 46 | 46,00 | 13        | 24 | 4,44  | 0,001                     | 0,024        | <b>271,546</b> |          |
| <b>Points topographiques</b>   |           |    |       |           |    |       |                           |              |                |          |
| Point 1                        | 13        | 31 | 35,21 | 12        | 5  | 46,57 | 0,001                     | 0,144        | <b>319,249</b> |          |
| Point 2                        | 13        | 30 | 56,75 | 12        | 7  | 19,34 | 0,001                     | 0,125        | <b>336,511</b> |          |
| Point 3                        | 13        | 30 | 56,10 | 12        | 8  | 12,60 | 0,001                     | 0,129        | <b>313,839</b> |          |
| Point 4                        | 13        | 30 | 16,61 | 12        | 8  | 53,31 | 0,001                     | 0,437        | <b>313,046</b> |          |
| Point 5                        | 13        | 29 | 53,59 | 12        | 9  | 14,84 | 0,001                     | 0,508        | <b>332,724</b> |          |
| Point 6                        | 13        | 27 | 28,31 | 12        | 11 | 18,08 | 0,001                     | 0,116        | <b>319,641</b> |          |

**Tableau 2** : Ensemble des résultats de la campagne GPS. Les coordonnées (x,y) sont celles des antennes GPS

Zm : altitude (m) sur margelle, tube piézo ou échelle limnimétrique dans le système local IGN

$\Delta z$  : erreur sur nivellement optique ; Inc95 : intervalle de confiance GPS à 95%

Les altitudes des différents points de mesure sont en mètres dans le système local IGN 1956. Les incertitudes s'expriment, d'une part par l'erreur faite au cours du nivellement optique des antennes, d'autre part par un intervalle de confiance à 95% déterminé par le logiciel.

#### IV.4. Critique des résultats

##### IV.4.a. Hypothèse sur le géoïde

Nous avons tenté de valider l'hypothèse faite sur le gradient du géoïde en utilisant le réseau de stations GPS permanentes de l'International GPS Service (IGS). (cf. Figure 13).

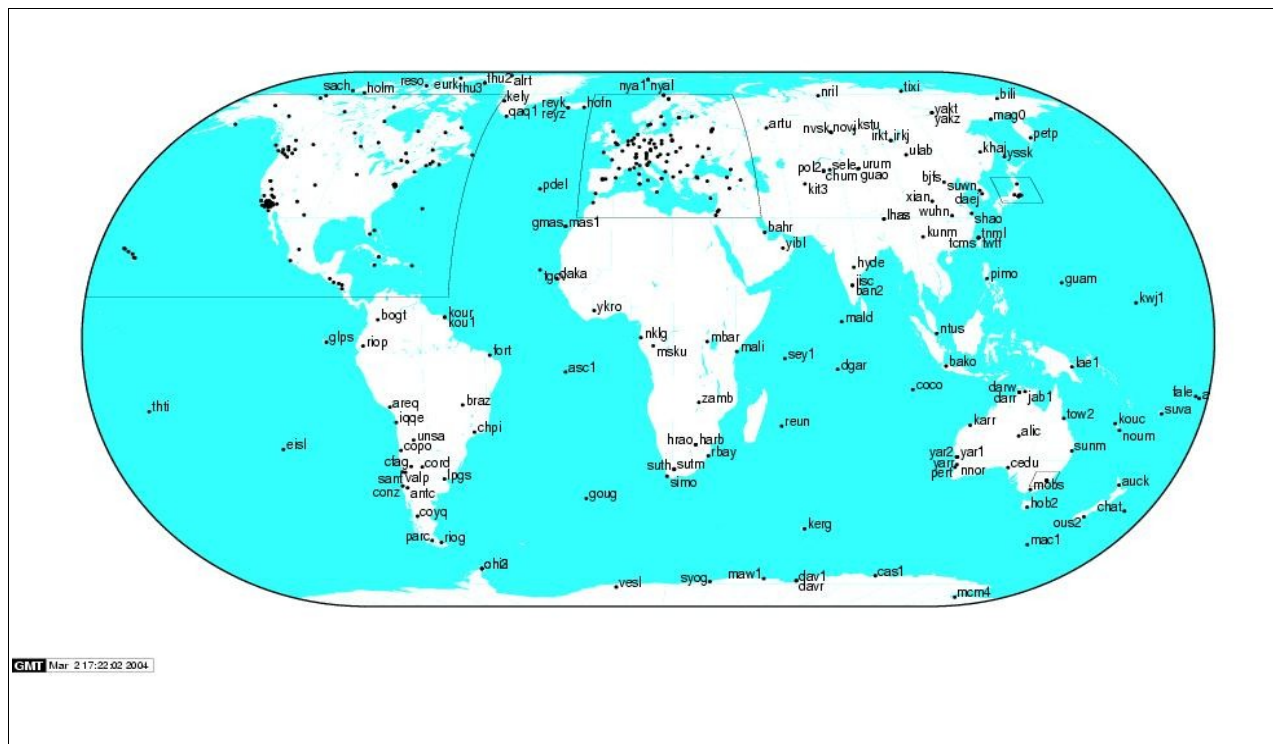


Figure 13 : Stations GPS permanentes du réseau IGS

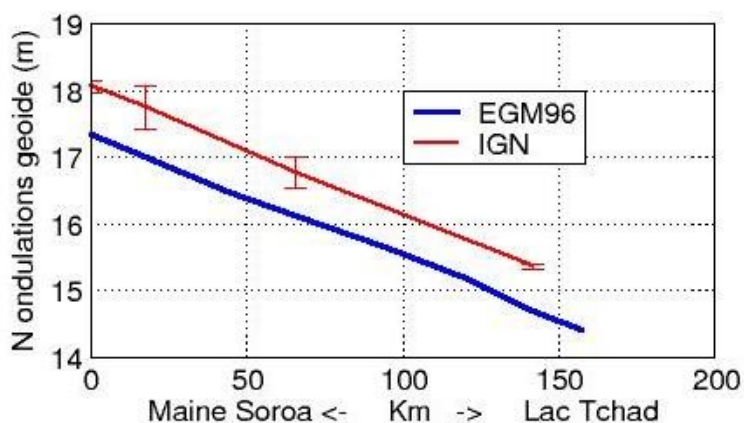


Figure 14 : Décalage entre les géoïdes EGM96 et celui de l'IGN "expérimental" obtenu avec la station GPS permanente de N'Koltang.

La station la plus proche de notre zone d'étude possédant des données disponibles se trouve être N'Koltang, au Gabon, à près de 2000 km de distance. Après avoir récupéré les fichiers GPS sur Internet,

nous avons calculé les hauteurs ellipsoïdales WGS84 de trois stations de référence, Maine Soroa, Diffa et la borne R22. Nous avons ensuite calculé les altitudes EGM96 de ces stations, et par comparaison avec les altitudes IGN, nous en avons déduit trois valeurs du décalage entre les deux géoïdes. Il apparaît ainsi (cf. Figure 14) un décalage constant de l'ordre de 80 cm entre les géoïdes le long de notre transect, confirmant ainsi notre hypothèse d'égalité des gradients spatiaux des géoïdes. Ce travail nécessiterait néanmoins un travail plus approfondi car les données de N'Koltang ne sont pas toujours de bonne qualité.

#### IV.4.b. Validation croisée des stations de référence

Chaque jour, le dispositif d'acquisition était un micro-réseau constitué de deux stations de référence et des puits et piézomètres. Pour chacun de ces micro-réseaux, nous n'avons traité que les références : nous avons comparé l'altitude d'une référence, calculée avec les données GPS de l'autre référence, à sa valeurs IGN. La Figure 15 montre les écarts ainsi obtenus pour chaque référence en fonction de l'intervalle de confiance fourni par le logiciel. On s'aperçoit qu'à l'exception du couple Bagé-R22 (altitudes 292.226 m et 286.792 m), les autres écarts sont acceptables au regard de l'intervalle de confiance.

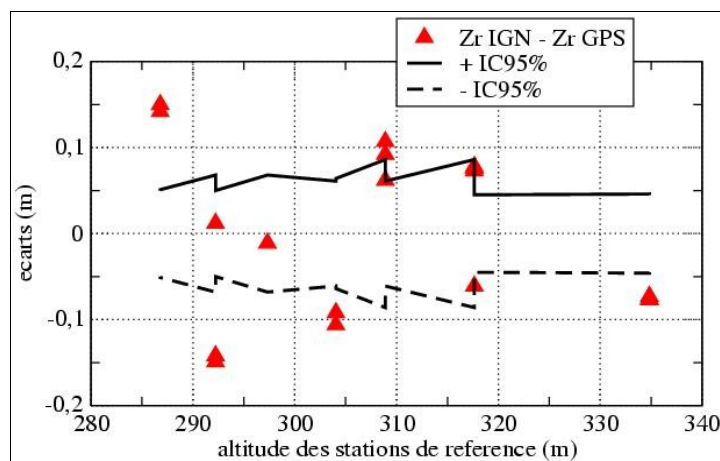


Figure 15 Comparaison des écarts d'altitude GPS / IGN des stations de référence avec l'intervalle de confiance du traitement GPS

#### IV.4.c. Incertitudes

Un travail complet sur les incertitudes des résultats nécessiterait, d'une part la connaissance des erreurs sur le géoïde EGM96, d'autre part l'estimation de l'erreur IGN. Celle-ci est évaluée à 1,5 mm par borne de référence : cette erreur est faible, mais a été calculée à partir d'une estimation de l'erreur globale moyennée par le nombre total de bornes. On ne connaît donc pas l'erreur relative à chaque borne.

Les erreurs faites sur nivellements optiques, malgré la qualité moyenne des lunettes utilisées, restent limitées à quelques mm.

Enfin, les erreurs propres à l'acquisition GPS sont tout à fait acceptables, comme le montre l'histogramme des Intervalles de Confiance à 95% (Figure 16). La valeur moyenne de l'IC est de 10 cm, et si on ne tient pas compte des relevés des points du transect topographique pour lesquelles les sessions GPS étaient très courtes (20 mn) et donc de qualité moyenne, la valeur moyenne de l'IC est de 6 cm.

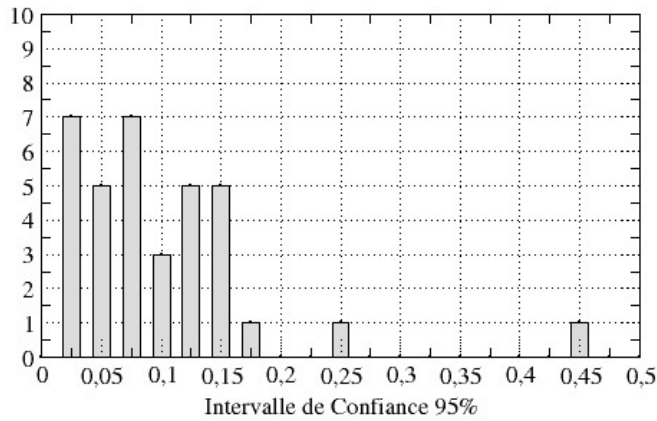


Figure 16 Histogramme des Intervalles de Confiance à 95% pour les 36 acquisitions GPS

#### IV.4.d. Une ou deux références ?

Est-il nécessaire d'utiliser deux bornes de référence à chaque acquisition ? A priori, la mise en oeuvre de deux stations de référence augmente la quantité de données GPS disponibles, et par conséquent la précision des résultats finals. Nous avons testé cette hypothèse en recalculant toutes les altitudes en prenant en compte soit l'une soit l'autre des stations de référence de chaque micro-réseau. Les résultats en terme d'IC95% et d'écarts en altitude sont représentés sur la figure 17.

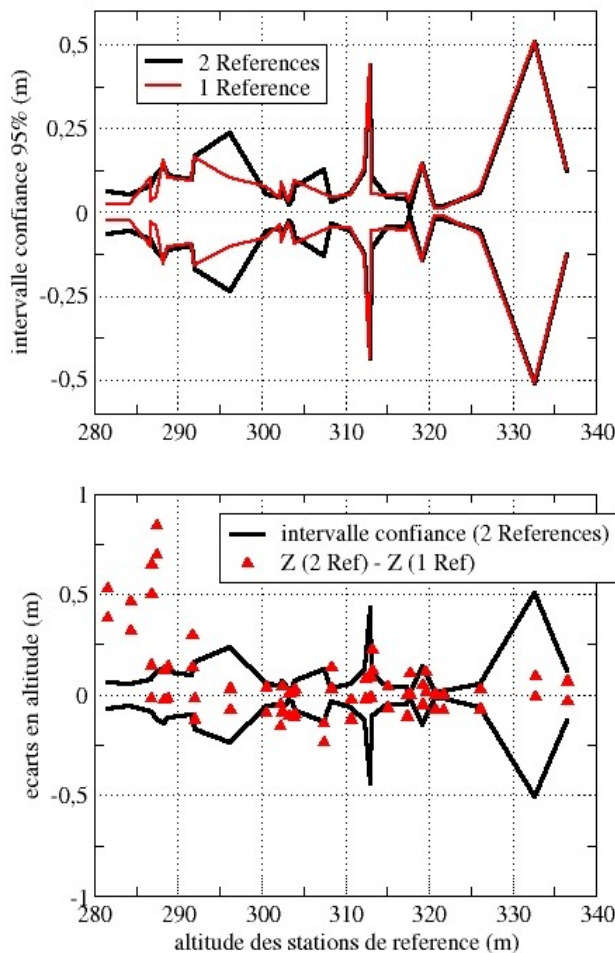


Figure 17 Influence du nombre de références utilisées pour le calcul de l'IC95% et des altitudes des

puits.

On ne constate aucune amélioration des Intervalles de Confiance, avec même parfois une petite augmentation de la précision avec une seule référence. Quant aux écarts d'altitudes calculés avec une seule référence, ils restent acceptables. A noter cependant des écarts importants pour les puits de Yeroua Gana Founari, Touboram, Tchoukoudjani et Baroua Gana Tchougoundi (partie gauche de la Figure). On notera que ces puits ont été nivelés avec les stations Bagué et R22 sur lesquelles nous avons déjà rencontré des problèmes ( § IV.4.b.)

#### IV.4.e. Profondeur du lac Tchad

Un dernier problème est apparu concernant l'altitude de la surface libre du lac Tchad : l'acquisition du 10 décembre donne une cote de 271,55 m au village de Kiri Kiri (Tableau 2), soit un dénivelé de 9 m par rapport au niveau de la Komadougou à l'échelle de Mamouri à 8 Km. Cette cote de 271,55, largement inférieure à la profondeur estimée de la cuvette Nord, soit 275 m, est donc anormalement faible. Le problème peut provenir 1) de l'acquisition GPS elle-même 2) du référencement de la borne de Mamouri (anciennement Magoméri); 3) de modifications de la topographie.

Concernant les données GPS, elles ont été vérifiées, et les traitements contrôlés : il n'est apparu aucune anomalie dans les données.

Pour évaluer la qualité du référencement de la borne de Mamouri, nous avons travaillé sur les écarts d'altitude avec d'autres références. Nous avons ainsi calculé les différences d'altitude entre Mainé-Soroa, Diffa, Bagué, R22 et Mamouri, d'une part grâce aux données IGN 1956, d'autre part par mesures GPS intégrant la station permanente de N'Koltang. On obtient le Tableau 3 :

|                 | <b>IGN (1956)</b> | <b>GPS (2003)</b> | <b>écart</b> |
|-----------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Maine - Mamouri | 53,05             | 54,35             | 1,3          |
| Diffa - Mamouri | 22,29             | 23,5              | 1,21         |
| Bagé - Mamouri  | 10,48             | 11,18             | 0,7          |
| R22 - Mamouri   | 7,04              | 6,21              | -0,83        |

**Tableau 3** Variations du différentiel d'altitude entre Mamouri et 4 stations du transect Mainé-Soroa/Lac Tchad

Malgré les nombreuses incertitudes qui pèsent sur cette méthode, on peut néanmoins dire que, même si la topographie a évolué ces 50 dernières années, les écarts d'altitude sont restés relativement constants. Si donc la borne de Mamouri a bougé, ce n'est guère plus de 1 mètre. Il est vrai par contre que durant cette même période, la nappe a baissé d'une quinzaine de mètres, pouvant modifier le géoïde. Quelle influence a pu avoir cette diminution de masse d'eau sur l'ondulation du géoïde, et donc sur l'altitude ?

Une autre explication réside peut-être dans la présence d'un minimum topographique local non répertorié au cours de la campagne bathymétrique de 1957 : ce minimum local aurait néanmoins une étendue assez grande.

## V. Quelques recommandations

Dans la perspective d'une future campagne GPS similaire, des modifications seraient à apporter à la méthodologie d'acquisition, notamment sur les points suivants :

- utiliser du matériel homogène (récepteur et antenne) afin de n'avoir à traiter qu'un seul type de capteurs et un seul logiciel d'acquisition;

- installer une station de référence permanente GPS au centre de la zone, station qui sera en acquisition continue tout au long de la campagne. En ce qui nous concerne, nous aurions installé une référence permanente à Diffa.

- utiliser une seule station de référence par micro-réseau; ceci permet de relier entre eux tous ces micros-réseau grâce à la référence permanente et de garder une sécurité en cas de panne, ou d'erreur de nivellement optique irrécupérable sur une référence.

Enfin, dans la perspective du programme ECCO/PNRH/Tchad, une recherche de données GPS de la surface du plan d'eau doit être effectuée, et éventuellement complétée par une campagne d'acquisition sur les différentes cuvettes du lac.

## **VI. Documents de référence**

Doerflinger E. (2001) Systèmes géodésiques, systèmes de coordonnées locaux et spatiaux. Support de cours, ISTEEM, Montpellier.

Doerflinger E. (2002) Le positionnement GPS et ses applications en Sciences de la Terre. Support de cours, ISTEEM, Montpellier.

Favre C. (2000a) Nivellement de puits par la méthode GPS au Niger. Carnets de route d'une expérience un peu particulière, <http://www.geometh.ethz.ch/favre/>.

Favre, C. (2000b) Nivellement de puits par la méthode GPS au Niger. Vermess. Photogramm. Kulturtech., 98(11), 662-666.

Favreau G. (2003) Impact de la variabilité climatique et des activités anthropiques sur le fonctionnement hydrologique dans le Bassin du Lac Tchad. Projet de l'AO du Programme National ECCO/PNRH, UMR HSM, Montpellier.

IGN (1958) Répertoire des emplacements et altitudes des repères de nivellement. Réseau du 1er ordre, feuilles de Bosso et de Maïné-Soroa.

IGN (1962) Carte du Niger, 1:200 000. Feuilles de Maïné-Soroa et de Bosso.

IGN (1993) Carte touristique du Niger, 1:2 000 000. Série Découverte des pays du monde, IGN et IGN.Niger.

Mevhysa (2000) Site WEB Mevhysa-Planet, <http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/mevhysa/>

Touchebeuf de Lussigny P. (1969) Monographie Hydrologique du Lac Tchad, ORSTOM.