

# Le cheminement du douzième parallèle (première partie)

■ Jean-Claude LEBLANC

Article tiré de *Jalon*, bulletin de l'association des personnels retraités de l'IGN, n° 146-bis de mai 2022.

Cette appellation désigne une épopée géodésique un peu oubliée 55 ans après. Je la classe parmi les grandes opérations confiées à l'Institut géographique national (IGN) et en particulier aux "Travaux spéciaux" de la 2<sup>e</sup> direction (géodésie et nivellement) de l'IGN. Elle vient après "l'axe 3000" (établissement d'une chaîne géodésique au Sahara), puis "le rattachement des Açores" à l'Europe et à l'Afrique par le système des chambres balistiques en 1965. Pour résumer la genèse du "12<sup>e</sup> parallèle", je reprends quelques lignes écrites dans "La boîte de Pandore", le deuxième recueil de souvenirs des agents de l'IGN réunis à l'occasion du cinquantenaire de l'IGN.

"L'idée a germé à Bukavu, au Zaïre d'aujourd'hui, en 1953. Elle a mûri à Helsinki en 1960, au congrès de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI) dont M. Laclavère était le secrétaire général, et s'est concrétisée à Nairobi en 1963. Le but de l'opération était de mesurer par cheminement un arc de parallèle qui traverse toute l'Afrique". L'US Army Map Service (USAMS) est responsable du programme. Elle contrôle les opérations en Éthiopie, au Soudan, au Nigéria et a confié à l'IGN les travaux dans les pays francophones. L'US Army Map Service est devenue peu après "US Army Topographic Command" désignée ensuite par "TC". Au Nigéria, le Federal Survey Department (FSD) participait aux opérations avec le TC. Pourquoi cette mesure ? Pour obtenir une nouvelle définition des dimensions de la Terre et, à terme, d'unifier les systèmes géodésiques des pays traversés, et plus tard de servir de base d'étalonnage des satellites ; le premier, Spounik-1, fut lancé le 4 octobre 1957.

## La participation de l'IGN

La finalité du "12<sup>e</sup> parallèle" était de mesurer, avec la plus grande précision permise par les techniques de l'époque, la distance entre la frontière Soudan-Tchad à l'est et l'océan Atlantique (Dakar). Comment ? Par un cheminement géodésique. À la fin des années 1960, les appareils de mesure des distances sont suffisamment précis : le cheminement succède à la triangulation.

Pour l'IGN, les opérations se sont déroulées sur quatre années : 1966-1970. Et pour diminuer la durée, deux missions furent montées les deux dernières années. En voici un résumé :

### MOTS-CLÉS

Cheminement douzième parallèle, IGN, Institut géographique national, astronomie de position, Wild T4, telluromètre MRA 1, géodimètre AGA 4D

- **décembre 1966 - mai 1967** : départ à la frontière Soudan-Tchad (à l'est de Abéché, vers Adré, c'est le point n° 1), jusqu'à 200 km de Fort Lamy (N'Djamena actuellement), cette mission est décrite dans cet article, tandis que celles de 1968 à 1970 seront publiées dans le prochain numéro ;
- **janvier à début mai 1968** : depuis le dernier point précédent jusqu'à la frontière Cameroun-Nigéria pour assurer les observations de la jonction avec le FSD du Nigéria ; puis traversée du Nigéria pour rejoindre le Niger (vers Dosso) ; puis assurer la jonction Nigéria-Niger avec toujours le FSD ;

- **octobre 1968 - avril 1969** : mission est : Dosso-Ouagadougou ; mission ouest : Dakar-Kayes ;

- **novembre 1969 - avril 1970** : mission est : Ouagadougou-Bamako ; mission ouest : Kayes-Bamako.

Toutes les missions se sont déroulées pendant la saison sèche en Afrique sahélienne. Les premières pluies apparaissent généralement en avril : les nuages rendent incertaines les observations des étoiles et les pistes en latérite deviennent des marécages, même pour les véhicules 4x4. Je détaillerai ensuite les missions auxquelles j'ai participé et résumerai les deux autres.

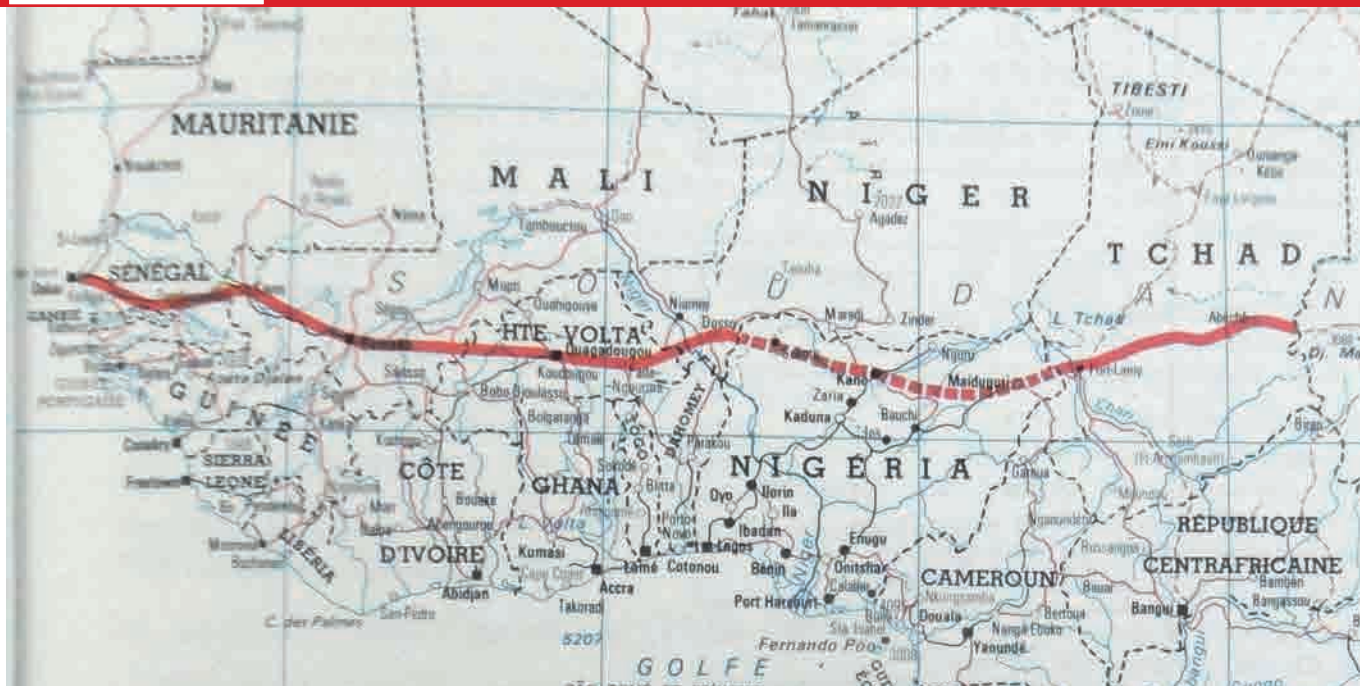
## Le résultat

Je donne le résultat global maintenant. La distance du point 1 (Adré, Tchad) au point le plus à l'ouest (à Dakar) représente environ 4 300 km. Cette distance fut mesurée au millionième, soit à  $\pm 4$  mètres. Cela peut paraître beaucoup. Alors je prends une distance plus "humaine". Paris mesure environ 9 km nord-sud et 11 km est-ouest. Imaginez qu'il faille mesurer ces dimensions à  $\pm 1$  cm, avec le matériel de l'époque, sans les appareils mono ou bifrécquences !

Pour la participation de l'IGN, je reprends un passage écrit dans le livre précité : "Des résultats ? 240 sommets dont 117 points de Laplace pour 3 452 km de cheminement et 1 300 km de nivellement de précision, 160 signaux de hauteur moyenne de 15 mètres".

## Quelques spécifications techniques

Il fallait obtenir la meilleure précision possible, d'où des prescriptions techniques rigoureuses imposées par le Topographic command (TC), elles



**Le trajet** : cette carte est extraite du Bulletin d'information de l'IGN n° 25 de mars 1974. Elle montre l'ensemble du trajet entre l'est du Tchad et Dakar.



sont identiques à une vaste opération géodésique observée par les USA *"la transcontinental traverse qui s'étend sur 5 000 km entre Beltsville (Maryland) sur la côte est des États-Unis et Noses Lake (État de Washington) sur la côte ouest"* [extrait du Bulletin d'information de l'IGN, BI n° 25]. Les principales spécifications sont les suivantes. Un point sur deux en détermination astronomique (dit "point de Laplace") ; mesure des distances au cm, côtés compris entre 5 et 40 km ; rattachement au nivellement de précision tous les 75 km environ ; observations angulaires toujours centrées sur le repère principal, même si les observations sont faites sur un signal ; cheminement rectiligne à  $\pm 20^\circ$  avec la moyenne des angles inférieure à  $10^\circ$ . Tout cela sera ensuite détaillé.

## Mon début de carrière à l'IGN

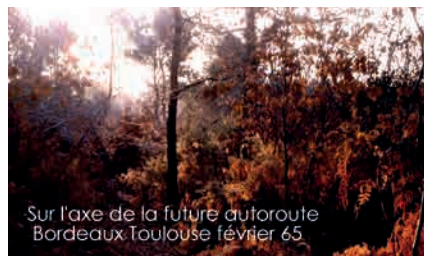
J'ai intégré l'École nationale des sciences géographiques (ENSG) en novembre 1960 et j'ai suivi les deux ans du cycle des Ingénieurs des travaux géographiques de l'État (ITGE). Mon seul camarade de promotion, Roger, m'a servi de guide, lui qui connaissait déjà l'École. De novembre à avril, les cours étaient à Saint-Mandé et de mai à septembre, les stages pratiques se déroulaient en Provence.

De novembre 1962 à mars 1964 : Service national à Thionville (quatre mois et hiver très rigoureux), puis Châlons-sur-Marne (redevenu "en Champagne" en novembre 1995, six mois) puis Fontenay-le-Comte (sept mois).

En avril 1964 : retour à l'IGN. À cette époque, au retour du Service, les ingénieurs et géomètres étaient affectés un an à la 3<sup>e</sup> direction (topographie, photogrammétrie), puis un an à la 2<sup>e</sup> direction (géodésie, nivellement), puis au bout des deux ans à l'une de ces directions. Pendant mon stage à la 3<sup>e</sup> direction, j'ai passé deux mois de stéréopréparation à Montech (Lot-et-Garonne), puis quatre mois de complètement d'esquisse planimétrique vers Graulhet (Tarn), puis deux

mois de complètement à Éauze (Gers). Au début de l'hiver, Roger me propose de me porter candidat à un lever dans la région de Marmande. Le chef de la 3<sup>e</sup> direction, notre vénéré Raymond D'Hollander, accepte et je suis désigné pour effectuer le lever direct au 1:2000 (ou 1:2500) dans la forêt du Mas d'Age-nais (Lot), en vue du tracé définitif de la future autoroute Bordeaux-Toulouse, la photogrammétrie ne convenant pas en zone boisée (mi-janvier à mi-avril 1965).

En avril 1965 : nous sommes affectés à la 2<sup>e</sup> direction. Avec mon camarade Gérard, nous participons, pendant cinq mois, à une mission d'astronomie de position : mesurer les coordonnées astronomiques de points connus en coordonnées géographiques à raison d'un point tous les 60 km environ, dans un grand triangle compris entre Bordeaux, le sommet de La Rhune (Pays Basque) et Carcassonne, soit une vingtaine de points. Comme souvenir exceptionnel, je retiens les trois jours et trois nuits passés au Pic du Midi (2 875 mètres moins les 15 mètres pour



En février 1965...



... et le 14 août 2014.



Superbagnières (vers 2 000 m).





Le Pic du Midi (photo de 1968) et la maquette du Pic par les Ateliers du Slog et Basic Théâtral de Lyon (vers 1990).

construire l'observatoire) ; l'air était si pur que nous pouvions voir la côte atlantique et la côte méditerranéenne et en prime, deux soirs, le fugitif et évanescent rayon vert.

L'hiver 1965-1966 s'est passé en calculs de géodésie. Quel plaisir de "descendre un tableau de Doolittle" (compensation par moindres carrés), avec la table de valeurs naturelles à 8 décimales et la calculatrice électrique Friden à 16 décimales !

Puis arrive fin avril 1966. Je devais être affecté à la 2<sup>e</sup> direction, MAIS je suis "kidnappé, détourné" par le chef de la 5<sup>e</sup> direction (matériels, à l'époque). En 1966, René Joly, l'un des membres du cabinet de Georges Laclavère (directeur général), assure l'intérim du chef de la 5<sup>e</sup> direction. *[Quand il m'a reçu, il m'a dit qu'il connaissait bien JJ. Levallois (le chef de la 2<sup>e</sup> direction) : ils jouaient au football ensemble, l'un était arrière gauche et l'autre ailier droit. Il m'a fait aussi une confidence : c'est le poste le plus intéressant qu'il a occupé, après Dalat bien sûr (ville du Service géographique d'Indochine !) ; j'ai vérifié ce point de vue 15 ans plus tard...]* En avril 1966, il m'a surtout expliqué qu'il fallait un opérateur qui connaisse bien le matériel qui allait être utilisé dans les travaux des futures missions dites "du 12<sup>e</sup> parallèle". Je ne l'ai pas encore regretté ! C'est ainsi que je suis affecté à la "Division d'électronique, de chimie et de géophysique". Je suis accueilli par Pierre Didey et Michel Deck, qui sont devenus des amis, ainsi que par toute l'équipe, que je retrouverai en partie 15 ans après (bis).

D'avril à décembre 1966. Je passe l'été et l'automne à Saint-Mandé. Je me familiarise avec tous les matériels élec-

troniques de terrain, en particulier avec le matériel de chronométrie utilisé en astronomie (aspects mécanique et électronique) et les instruments de mesure des longueurs : telluromètre et géodimètre.

Les telluromètres MRA1 sont arrivés à l'IGN au début des années 1960. En 1966, ils servaient encore dans les brigades de géodésie. Je me suis principalement formé sur les MRA2 des "Expéditions polaires françaises" (EPF) qui étaient entretenus par l'IGN. (Le MRA2 est de même technologie que le MRA1, mais il a un gros intérêt pour les travaux des EPF : l'antenne peut être déportée de quelques mètres, donc hors des véhicules Weezel).

En 1966, la division avait un géodimètre AGA4 équipé d'une lampe tungstène pouvant porter jusqu'à 6 km, voire 8 km au maximum. Nous avons fait beaucoup d'essais sur la base géodésique de Châlons-sur-Marne : c'était mon apprentissage, ma formation très bien encadrée.

## Organisation générale d'une mission (sauf la 2<sup>e</sup>)

### Personnel

La mission type comprenait vingt à vingt-deux personnes IGN, réparties en cinq équipes : le commandement, la reconnaissance et la construction, deux équipes d'astronomie, une équipe de géodésie. Ensuite deux (ou trois Américains) du TC étaient présents pendant toutes les missions : le (ou les) *contractor officer* et le contrôleur des fréquences.

J'ajoute aussi le personnel local, environ vingt Africains permanents : chauffeurs, aides-mécaniciens, aides-échauffeurs, cuisiniers et aussi les manœuvres embauchés selon les besoins ponctuels comme pour l'équipe de construction ou les porteurs. Sans eux, les missions n'auraient pas pu se dérouler ainsi.

### Véhicules

Six Land Rover type 109 ; huit poids lourds légers ; huit poids lourds type Citroën T 46 et T 55.

### Matériel technique (pas en détail)

- IGN : deux Wild T4, cinq Wild T3, quatre Wild T2 ; cinq telluromètres MRA1

(deux maîtres et trois répondeurs) ; deux niveaux IGN50 ; trois chronomètres à quartz ; deux chronographes imprimants ;

- américain : deux AGA 4D ; deux jeux de vingt-sept prismes.

### Matériel de signalisation et de construction

Deux échelles Delooz ; cinq ou six signaux Bilby (fournis par le TC) ; deux signaux "Entrepose" doubles (pour signaux inférieurs à 10 m).

### Moyens de communication

Un BLU (bande latérale unique) ; six émetteurs récepteurs ANGRC9 ; deux récepteurs ANGRC9 ; six Apolex 10.

## Le commandement

Le commandement comprend le chef de mission, un ou deux secrétaires et le mécanicien.

Le rôle du chef est d'assurer la gestion globale de la mission, les liaisons par radio par BLU avec le centre IGN de Brazzaville (souvent avec le relais de Bangui les deux premières années), puis du centre de Dakar, des relations avec les autorités locales (les douanes en particulier) et françaises comme pour le ravitaillement en carburant.

L'un des secrétaires prend en charge la partie administrative et comptable, le second, polyvalent, pouvant remplacer le secrétaire d'une autre équipe et aussi ravitailler parfois en vivres (exemple des fruits et légumes) les autres équipes, car il n'y a pas de supérette tous les 30 km...

Le mécanicien possède dans son camion un poste à souder, des pièces de rechange de première nécessité comme les lames de suspension pour Land Rover et Power Wagon, quelques pneumatiques. Les plus grosses pièces sont commandées au centre puis envoyées (exemple des barres de direction et des trompettes – essieu avant – des Land Rover). Le mécanicien ne manquera pas de travail ! Le commandement héberge le superviseur américain qui reste présent pendant toute la mission. Le chef des travaux spéciaux (TS) de la géodésie, Michel Louis, dont le nom sera cité plusieurs fois, est venu deux ou trois semaines pour lancer la première mission au Tchad.



## Les équipes de terrain

Les équipes de terrain sont au nombre de quatre :

- l'équipe de reconnaissance et de construction qui comprend six personnes réparties en deux ou trois pour la reconnaissance et quatre ou trois pour monter les signaux ;
- les deux équipes d'astronomie qui se composent chacune de deux opérateurs et d'un secrétaire. Un point sur deux est un point "astro", donc chaque équipe stationne un point sur quatre pour observer un "point de Laplace" ;
- l'équipe de géodésie qui comprend trois opérateurs et deux ou trois secrétaires stationne les points intermédiaires, donc un sur deux et parfois, rarement, deux points géodésiques se suivent.

Ces trois équipes sont "indépendantes dans l'interdépendance" comme l'explique la suite.

## L'équipe de reconnaissance et de construction

Cette équipe comprend six personnes. L'équipe de reconnaissance doit trouver les points qui seront stationnés par les trois équipes d'observation. Les distances entre deux points sont comprises entre 5 et 40 km (chiffres précisés plus tard) et les côtés doivent être alignés à  $\pm 20$  degrés, la moyenne des angles du cheminement doit être inférieure à 10 degrés.

L'équipe doit aussi reconnaître l'emplacement des repères de nivellement.

Cette équipe a donc "plusieurs coups" d'avance, parfois 100 km, sur les équipes d'observation.

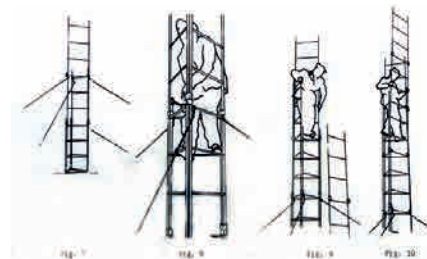
Pour s'assurer que la visée passe entre les points successifs, l'équipe dispose de deux "échelles Delooz" pouvant monter jusqu'à 24 mètres. Ensuite, il faut éventuellement assembler les signaux "Bilby" pouvant atteindre 24 m (en France jusqu'à 48 m). Il faut matérialiser le point par un bloc de béton assez solide qui retient le repère principal et qui recouvre un repère souterrain (à 1,2 m de profondeur selon les clauses techniques) ou graver un bloc rocheux. Si le point principal est au sol, mais ne voit pas l'un des points avant ou arrière, la reconnaissance doit prévoir un repère

d'azimut à plus de 800 m. Autre obligation pas toujours facile, il faut piquer, sur les photos au 1:50 000 anciennes de 15 ans, un point identifiable, souvent un arbre. L'équipe des constructeurs est aussi tributaire des observations : elle ne peut démonter le dernier signal que lorsque les calculs, effectués par la dernière équipe d'astronomie, sont dans les tolérances.

### ■ Pourquoi monter des signaux ?

Voyons le cas de la distance moyenne de 15 km entre deux stations du cheminement. Vous savez que la Terre est ronde. À la reconnaissance, c'est la formule approximative simple qui s'applique :  $D_n = D^2/15$  ( $D_n$ , la dénivelée en mètres,  $D$  en km).

Elle tient compte du niveau apparent et de la réfraction du rayon lumineux.



Donc, dans le cas de  $D = 15$  km,  $D_n = 15$  m. En sol plat, il faudrait élever chaque point de 7,5 m. Mais il faut tenir compte des conditions locales : relief, végétation (les arbres) et prendre une sécurité de quelques mètres.

Extrait de la notice de montage de l'échelle Delooz (vers 1950) :

*L'échelle s'appuie au sol sur une embase triangulaire de 50 cm. Le 1<sup>er</sup> élément d'un mètre est posé, puis le 2<sup>e</sup> de 2 m, puis les 3<sup>e</sup> de 3 m ; ce qui maintient*



**Signal Bilby** (créé par Jasper S. Bilby en 1926)

**À gauche** : début de la construction du signal qui est double. Les éléments intérieurs portent les appareils d'observation, les éléments extérieurs portent les opérateurs et le matériel annexe.

**Au centre** : exemple de signal Bilby, d'environ 18 m. Les signaux pouvaient monter jusqu'à 24 m : imaginez-vous grimper le long de la façade d'un immeuble de huit étages, avec parfois le théodolite T3 de 18 kg dans le dos ! Les premières fois, on serre bien fort les échelons, surtout à la descente. Le matériel était monté avec une corde, une poulie et... deux bras.

**À droite**, détail des échelons qui mesurent 41,6 cm (vérifié sur un plan).

En France, les Bilby montaient jusqu'à 48 m ; les cerceaux de sécurité furent rendus obligatoires plus tard.





le décalage d'un mètre ; ensuite tous les éléments mesurent 3 m jusqu'au sommet et en fin, à 24 m, sont placés les derniers éléments de 2 et 1 m.

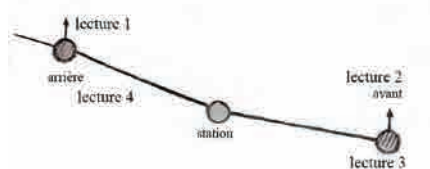
L'échelle de reconnaissance Delooz ; les câbles de maintien sont esquissés (voir ci-contre).

### Signal Entrepose

Le signal est constitué par des tubes "Entrepose" de 1,80 m pour l'intérieur et 2 m (environ) pour l'extérieur. Au douzième parallèle, ces signaux n'étaient pas montés à plus de 10 m de haut.

## Mesure des angles du cheminement

### ■ Qu'est-ce qu'un couple ?



Le théodolite est en place au point de station. L'appareil possède deux limbes gradués : le cercle horizontal et le cercle vertical (inutilisé ici). À la première mesure, on vise le point arrière, on tourne le cercle horizontal pour lire "zéro" sur l'index de lecture ; le cercle vertical est à gauche de la lunette (CG). On vise le point avant, en tournant l'appareil dans le sens horaire et on fait la lecture sur le cercle horizontal, ce qui donne une première valeur de l'angle. Ensuite, on fait un double retournement : la lunette fait un demi-tour sur elle-même (elle vise alors vers l'arrière) donc, il faut ramener la lunette et son support (l'alidade) vers le point avant, le cercle vertical est alors à droite de la lunette (CD). On fait la lecture sur le point avant, on tourne la lunette et l'alidade vers le point arrière dans le sens antihoraire, on fait la lecture voisine de zéro. C'est l'ensemble de ces deux mesures (CG + CD) qui s'appelle "un couple".

Pour le 2<sup>e</sup> couple, on fait les mêmes opérations en tournant le cercle horizontal pour afficher 100 grades ; pour le 3<sup>e</sup>, on affiche 50 grades, pour les suivants 150, 25, 125, 75, 175.

Cette méthodologie permet d'éliminer trois principales erreurs instrumentales (non-verticalité de l'axe principal, touril-

lonnement, défauts des graduations du limbe).

Les spécifications techniques sont bien précisées :

- une soirée = deux groupes de huit couples ; tout pointé à plus de 3" de la moyenne doit être refait ;
- l'erreur probable entre deux groupes de 8 couples est 1,5" (symbole expliqué plus loin).

**Une détermination** comprend deux soirées observées soit sur deux nuits soit la même nuit à condition de respecter un délai de deux heures entre la fin de la première détermination et le début de la deuxième.

L'erreur probable entre les deux soirées est  $\pm 0,3''$  ; si ce dernier critère n'est pas respecté, il faut observer une 3<sup>e</sup> soirée, ce qui sera parfois le cas.

L'erreur probable est celle qui a une chance sur deux de ne pas être dépassée.

**Un repère d'azimut**, aux points d'astronomie, doit être matérialisé au sol lorsque le sommet est observé depuis un signal ou lorsque, du sol, le point stationné ne voit pas l'un des deux autres points du cheminement. Le repère doit être à plus de 800 m et mesuré avec quatre couples.

**Les observations angulaires** se pratiquaient en fin de journée ou de nuit, toujours sur projecteur. Le T3 devait être centré, ce qui était facile pour les points au sol. Dans le cas d'un signal, il fallait "relever" le repère principal. Pour cela, deux théodolites (T3 ou T2) étaient placés à angle droit, à environ 20 m du signal. Il fallait donc être à deux et si possible à trois personnes : une à chaque théodolite et une au sommet du signal pour déplacer et centrer le support du matériel d'observation. Sur un signal, les projecteurs étaient fixés sur la rambarde et alignés au mm avec le T3 centré.

## Le nivellement

Tous les points d'astronomie doivent être rattachés au nivellement de précision ; dans la pratique ce sont tous les points du cheminement. Les itinéraires entre Adré et la jonction Cameroun-Nigéria, d'une part et entre Dakar et

Bamako, d'autre part furent nivelés dans les années 1950-1960. Des grandes boucles de nivellement de précision, de l'ordre de 1 000 km, avaient été observées en suivant les grands axes, les principales pistes. Par contre, les missions entre Dosso et Bamako ont dû niveler une bonne partie du cheminement, ce qui sera évoqué dans le résumé de chaque mission.

La précision demandée est de  $\pm 0,30 \text{ m} \sqrt{D}$  en km, soit environ 1 m pour 10 km. Ce chiffre peut paraître large ; les altitudes servant à réduire sur l'ellipsoïde les distances observées sur le terrain.

Le cheminement planimétrique était aussi un cheminement altimétrique.

Un point sur quatre ou cinq était rattaché au nivellement de précision, soit directement soit en combinant nivellement direct et nivellement trigonométrique (mesures des distances au telluromètre et des angles au T3). Ensuite, tous les sommets du cheminement étaient rattachés par nivellement trigonométrique (ou indirect). Les observations sont réciproques et vraiment simultanées car "au top" transmis par la radio du telluromètre. Elles étaient faites généralement en début de soirée ; c'est une mauvaise heure, car la réfraction varie rapidement d'où les observations "au top". La meilleure période et la plus pratique était entre 10 h et midi.

Il fallait bien sûr prendre les cotes des projecteurs et des T3 depuis le repère au sol. Dans le cas d'un signal, sa hauteur était mesurée au centimètre à l'aide d'une chaîne de 20 m ou de 50 m.

## Les équipes d'astronomie

La mission se compose de deux équipes d'astronomie et chaque équipe de deux observateurs et d'un secrétaire. Un point sur deux est un "point de Laplace" : point où sont recherchées les coordonnées latitude et longitude astronomiques à partir des étoiles et en plus l'orientation des côtés par rapport à l'étoile Polaire. Chaque équipe dispose d'un appareil dit "impersonnel" Wild T4 pour les observations sur les étoiles et d'un Wild T3 pour les observations angulaires. (Des explications suivent ce paragraphe). Chaque soirée d'observation astronomique, chaque graphique,







doit comprendre 12 à 16 étoiles, elle dure entre 1 h 15 min et 1 h 30 min. Une nuit, chaque opérateur observe une soirée, puis recommence une autre nuit. Donc, chaque point est déterminé quatre fois, à condition que les critères de précision soient respectés, sinon, il faut recommencer deux autres soirées. De ces observations sont calculées les coordonnées géographiques de la station. Le T4 est toujours au sol, mais à moins de 100 m du repère principal. Chaque équipe doit orienter les côtés du cheminement par rapport à la polaire. Les opérateurs doivent observer une série de seize couples un soir et une autre série de seize couples un autre soir, soit deux déterminations par point ; mais si les deux séries diffèrent de 1", une autre série, un autre soir, est nécessaire. Chaque équipe doit aussi mesurer l'angle du cheminement, seize couples un soir, puis seize couples un autre soir (ou bien deux fois seize couples la même nuit à condition de respecter deux heures entre la fin de la première série et le début de la deuxième). Et s'il existe, il faut aussi mesurer l'angle du repère d'azimut. Les observations sur la polaire et les mesures de l'angle sont faites depuis le sommet du signal s'il est construit.

## Les observations des étoiles

Les observations pendant les missions du 12<sup>e</sup> parallèle sont faites au T4. (Les appareils de terrain employés sont les plus précis de l'époque : soit le Kern



T4 de l'ancienne galerie IGN Doc. IGN : T4 sur son trépied lesté et gros plan sur la nivelle.

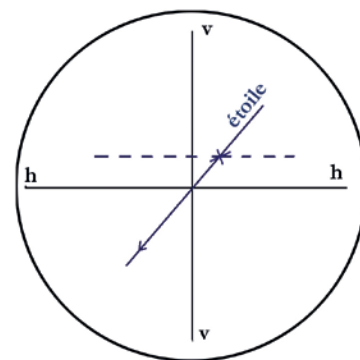
DKM 3A soit le Wild T4. L'IGN en possédait respectivement 4 et 3).

(En fin de travaux, le trépied du T4 est démonté ; la partie métallique retourne en France et la partie en bois est brûlée sur place pour éviter d'importer des parasites).

L'observation se fait par l'oculaire qui est en bout de l'axe des tourillons et la lecture du limbe par la petite lunette au-dessous (à droite sur l'image ci-contre) : quelles facilités pour l'opérateur !

Le T4 est ainsi un télescope de terrain de 60 kg environ. Le grossissement de l'optique est de 65 X et la focale de 550 mm. Une fois l'appareil en place, il faut attendre la nuit et au minimum encore une heure pour que tout l'instrument soit stabilisé. La précision des mesures est liée à la stabilité et à la précision de la nivelle (cliché de droite) qui permet de maintenir la lunette à la distance zénithale constante. Voici une petite explication sur la précision de cette nivelle. Le verre est gradué et l'intervalle entre deux traits correspond à un écart angulaire de 2" (2 secondes sexagésimales) : c'est l'angle sous lequel on verrait un objet de 2 mm à la distance de 210 m). La fiole, le liquide avec la bulle, est illuminée par des sources autoluminescentes qui permettent de lire les extrémités de la bulle sans autre éclairage, bien commode la nuit.

Les boutons moletés de fin mouvement permettent de suivre le déplacement de l'étoile ; ils entraînent un système qui déclenche des impulsions électriques qui commandent l'imprimante, ce qui



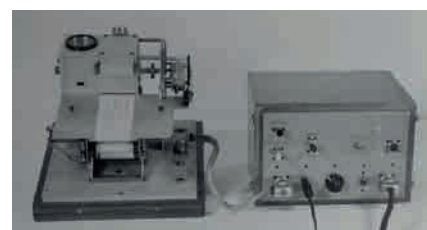
Le réticule (simplifié) comporte deux traits fixes : un vertical et un horizontal. Un trait horizontal mobile (en pointillés bleus) permet de suivre l'image de l'étoile qui se déplace.



Agrandissement du côté oculaire avec nivelle et l'un des deux boutons moletés (rond brillant, tirets blancs) ; le second est sur le même axe, caché ici ; le micromètre est ainsi tourné avec les deux mains.



Chronomètre à quartz mis à l'heure avec le récepteur de signaux ANGRC9.



Chronographe imprimant avec son amplificateur mis à l'heure par le chronomètre à quartz.



Les équipes d'astronomie de la 3<sup>e</sup> mission ouest.

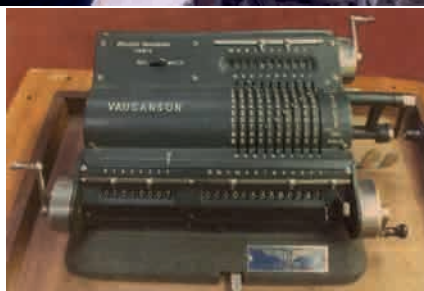
#### Une petite Vaucanson.

permet de connaître l'heure de passage. L'opérateur ne fait pas les lectures, voilà pourquoi le T4 est appelé "impersonnel". Le T4 est mis en station à la distance zénithale 30° pour avoir une distance observée de 30°00'30" qui tient compte d'une valeur approchée de la réfraction (déviations du rayon lumineux dans l'atmosphère). Les étoiles sont choisies dans les catalogues calculés à l'IGN pour des latitudes de 5' en 5' (minutes sexagésimales). L'heure sidérale de chaque étoile est connue, mais cette étoile "avance" chaque soir de 3 min 56 s par rapport à l'heure civile. Il faut deux chronomètres : l'un en temps sidéral (qui lui indique l'heure approchée du passage de l'étoile) et l'autre en temps moyen (comme une montre).

Les catalogues fournissent toutes les références pour observer l'étoile : les coordonnées astronomiques (ascension droite et déclinaison), l'heure de passage, l'azimut, l'angle à l'astre, etc., de 600 (?) étoiles jusqu'à la magnitude, la grandeur 6 (la polaire est de grandeur 2). Ces coordonnées sont issues du FK3, "Fundamental Katalog n°3" qui contient 1 535 étoiles jusqu'à la magnitude 7,5.

#### ■ Tâches à chaque sommet d'astronomie et précisions requises

- déterminer les coordonnées géographiques, latitude et longitude, à  $\pm 0,3''$  (0,3 seconde sexagésimale) ;
- mesurer l'angle de la station, depuis le repère principal au sol ou depuis le point centré sur le signal en observant deux séries de seize couples, écart



probable inférieur à  $\pm 0,30''$  ;

- mesurer l'azimut des deux côtés du cheminement par rapport à la polaire, également à deux séries de seize couples (à trois directions : avant, arrière et polaire) toujours à  $\pm 0,30''$  ; comme il sera expliqué plus loin :  $0,3'' = 1 \text{ dmgr}$  (décimilligrade) ; pour obtenir ces précisions, les tolérances intermédiaires sont très strictes ; il faut parfois, voire souvent, observer une troisième nuit, pour parvenir à des coordonnées géographiques satisfaisantes ;
- mesurer l'azimut du repère terrestre s'il existe ;
- mesurer les distances zénithales avec l'équipe de géodésie ;
- rattacher les points auxiliaires au point principal (la station d'astronomie, au sol, doit être à moins de 100 m du repère principal) ;
- effectuer tous les calculs avec la table de valeurs naturelles à 8 décimales et la calculatrice Vaucanson à 16 décimales.

#### ■ Principe de la construction d'un graphique

La méthode s'appelle "hauteurs égales" ; dans la pratique les observations se font à la distance zénithale  $z$ , valeur complémentaire de la hauteur (angle au-dessus de l'horizon). D'une part, les observations sont faites avec le

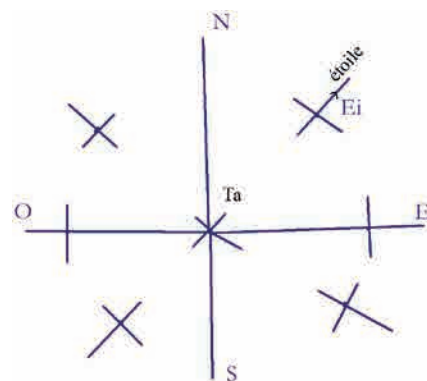
théodolite T4, à la distance zénithale affichée  $z = 30^\circ$  et d'autre part, l'opérateur dispose de catalogues calculés pour la distance zénithale de  $30^\circ 00' 30''$ .

**La formule fondamentale** de trigonométrie sphérique est la suivante :

$\cos z = \sin \delta \sin \varphi_0 + \cos \delta \cos \varphi_0 \cos AH_0$   
avec  $z$  = distance zénithale calculée à partir des éléments connus qui sont :

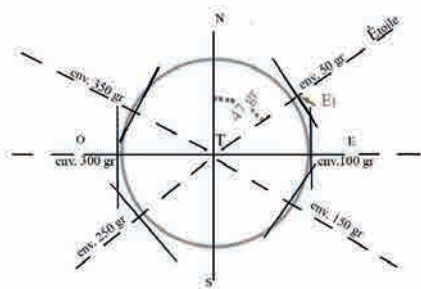
$AH_0$ , l'angle horaire de l'étoile =  $H_G + \Delta\lambda_0 - \alpha$  ;  
 $H_G$  = l'heure de Greenwich en TU à l'instant de l'observation ;  
 $\alpha$  et  $\delta$  : les coordonnées de l'étoile, fournies par le catalogue ;  
 $\varphi_0$  et  $\Delta\lambda_0$  les coordonnées approchées de la station.

Tous ces éléments, connus ou estimés, permettent de calculer la distance zénithale  $z$  et de la comparer à la distance zénithale observée ; soit " $dz$ " cette différence. Comme exemple, sur le schéma ci-contre, seules six étoiles sont représentées. Sur la direction azimutale de chaque étoile, il faut reporter " $dz$ " =  $TaEi$  ( $i = 1$  à 6). Si tout était parfait, ces six points  $Ei$  seraient sur le même cercle (toutes les " $dz$ " seraient égales). L'opérateur dispose d'un calque transparent sur lequel sont dessinés des cercles concentriques ; pour l'aider à choisir le cercle qui répartit au mieux les petits écarts, la perpendiculaire est tracée en chaque point  $Ei$  (schéma page suivante). Sans évoquer d'autres raisons théoriques, cette perpendiculaire est appelée "droite de hauteur" d'où le nom de "hauteurs égales" donné à cette méthode d'observation. Ci-après, voici un exemple complet de graphique. Ce ne sont pas des observations du 12<sup>e</sup> parallèle (les originaux



Le centre du cercle permet de définir le point "T" qui donne la position recherchée.

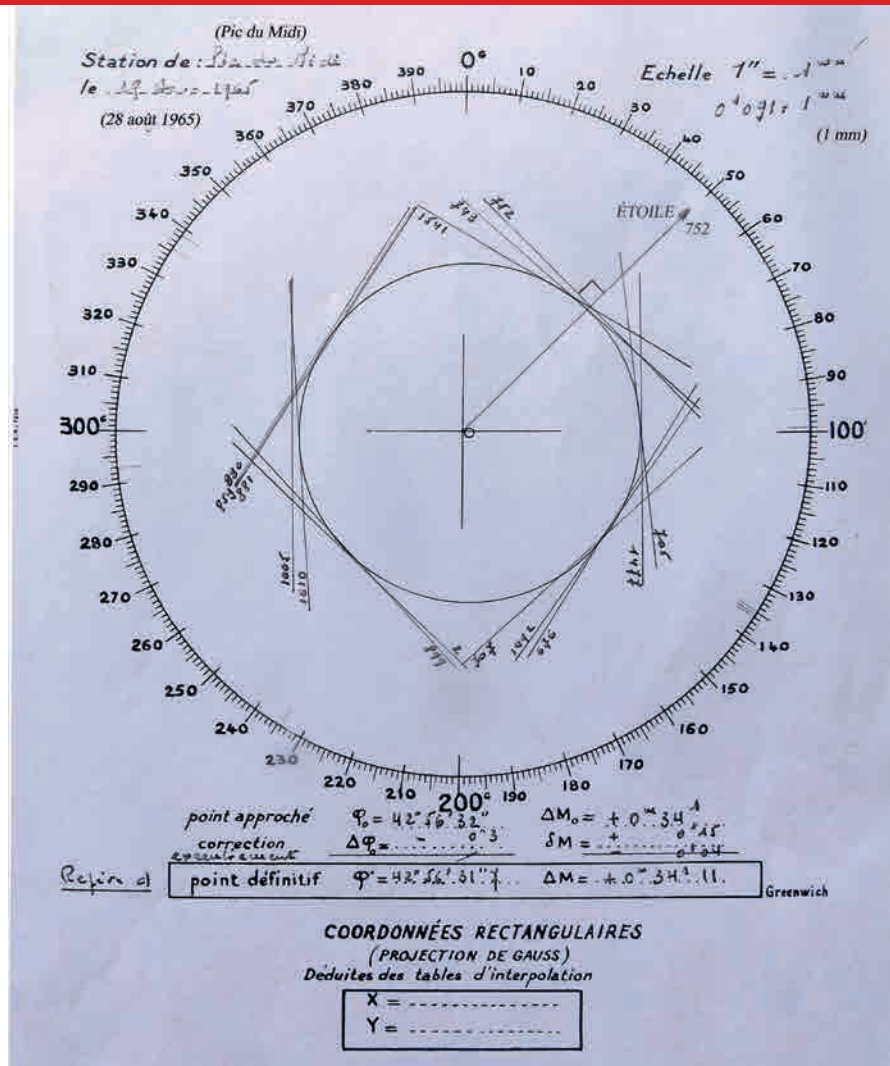




ont dû être remis à l'USTC). C'est un exemple personnel, oh combien symbolique, remis par Denys, alors responsable des archives techniques du SGN, le jour de mon départ à la retraite : une copie de mes observations au Pic du Midi, le 28 août 1965 !

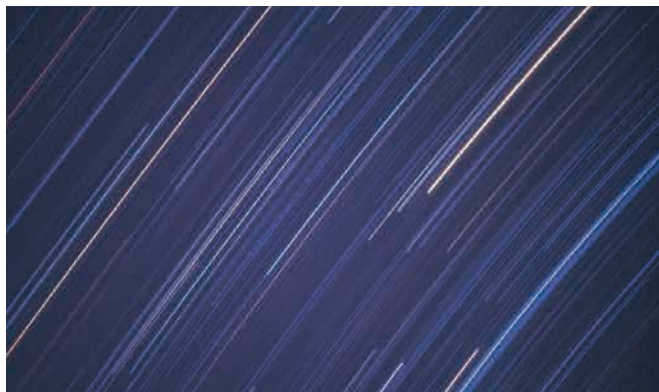
Sur le graphique, seule figure la direction (l'azimut) de l'étoile "752" (le grand cercle gradué est déjà sur l'imprimé donc pas besoin de dessiner les directions). Avec le décimètre placé au centre du graphique et dirigé selon l'azimut, la différence "dz" est reportée, puis la perpendiculaire est tracée. Il reste à choisir le bon cercle dont le centre donne la position. Si le graphique ne convient pas, il faut soit changer l'échelle du graphique soit refaire les calculs à partir des coordonnées qui viennent d'être calculées.

"dz" est un écart angulaire, pas une distance (le soleil "est" à 8 min ; l'étoile la plus proche, Sirius, à près de 9 années-lumière, Arcturus et la Polaire à environ 40 et 400 années-lumière). La soirée idéale comprend seize étoiles : trois dans les azimuts voisins de 50, 150, 250 et 350 grades, puis deux étoiles dites "horaires" à 100 et 300 grades, qui définissent le mieux la longitude. Toutes les directions "virtuelles" passent par le point qui correspond aux coordonnées approchées  $\varphi_0$  et  $\Delta\lambda_0$ . La dernière opération graphique consiste à choisir le cercle qui tangente le mieux les



16 tracés ; son centre donne les coordonnées provisoires de la station. En effet, les coordonnées définitives sont recalculées plus tard en tenant compte de beaucoup de petites corrections (une dizaine) que je n'évoque pas : c'est ici que commence le domaine des calculateurs, puis des scientifiques ! Le graphique présenté n'est pas le graphique original : celui-ci est le résultat définitif du calcul ultérieur par ordinateur (dont compensation par moindres carrés), ce qui explique

que le point définitif est très proche du point approché. C'est un graphique remarquable parce que fait après avoir apporté toutes les corrections et qui s'explique aussi par les conditions d'observations exceptionnelles (et peut-être par la concentration de l'opérateur ?). J'ai choisi ces deux photos ; le ciel était presque aussi pur que dans le Sahara (que j'ai un peu connu). Je penche pour l'un des Echo, car Pageos avait une orbite presque polaire (et probablement la trace d'une comète).



Ciel étoilé, exposition de plusieurs heures, en "pause T", à Abéché, janvier 1967.



Ciel avec passage d'un satellite soit Echo 1 ou Echo 2 soit Pageos, à Ati, avril 1967.





## Points de Laplace et polaire

Nous savons que la Terre est ronde, ce qui permet d'utiliser les formules de trigonométrie sphérique comme en astronomie de position. Mais la Terre n'est effectivement pas ronde ; la surface réelle de la Terre n'est pas connue, on la désigne sous le nom de "géoïde". Et pour effectuer les calculs, elle est assimilée à un ellipsoïde de révolution. Conséquence : les observations, sur le terrain, sont effectuées sur le géoïde et les calculs sur l'ellipsoïde. Au point de station, la direction de référence est la verticale, complément de l'horizontale indiquée par la nivelle de l'instrument. Et les calculs sont sur l'ellipsoïde avec comme référence la normale. (*L'écart est dû à l'angle entre la verticale au point d'observation et la normale à l'ellipsoïde au point homologue. Cet angle s'appelle "la déviation de la verticale" et nécessiterait bien d'autres explications*).

Pour le 12<sup>e</sup> parallèle, les calculs sont effectués sur "l'ellipsoïde de Clarke 1880" version RGS (*Royal Geographical Society*) comme décidé à la convention de Bukavu, dont voici deux paramètres :  $\frac{1}{2}$  grand axe "a" = 6 378 249,145 mètres et l'aplatissement "f" défini par  $1/f = (a - b)/a = 293,465$  ; (b =  $\frac{1}{2}$  petit axe) ; ce qui permet de calculer la différence a - b = a/293,465 = 21 734,3 m. Retenons l'ordre de grandeur de 22 km.

Géoïde et ellipsoïde ne sont confondus qu'au point fondamental ; pour le 12<sup>e</sup> parallèle le point fondamental est le point n° 1, le premier point astronomique à Adré, frontière Tchad-Soudan.

En résumé, les observations, sur le géoïde, permettent d'obtenir les coordonnées astronomiques latitude et

longitude ; les calculs, sur l'ellipsoïde, fournissent les coordonnées rectangulaires X et Y. Autre conséquence : l'azimut d'une direction n'a pas la même valeur sur le géoïde et sur l'ellipsoïde. Soit Aa l'azimut astronomique et Ag l'azimut géodésique, la différence entre les deux azimuts est donnée par la relation :  $Aa - Ag = (\lambda_a - \lambda_g) \cdot \sin \phi$  ;  $\lambda_a$  désigne la longitude astronomique,  $\lambda_g$  la longitude géodésique et  $\phi$  la latitude du lieu. Elle permet de passer de l'azimut observé à l'azimut calculé et donc, d'orienter successivement chaque côté. Cette formule est appelée "équation de Laplace" d'où le nom donné aux points astronomiques.

### ■ Pourquoi viser l'étoile Polaire ?

L'étoile Polaire décrit un cercle de moins de 1° autour du pôle nord ; elle le parcourt en 23 h 56 min, donc très lentement, d'où la précision du pointé à la seconde (de temps). La relation simple en astronomie de campagne : "la latitude est égale à la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon" fournit un autre avantage au 12<sup>e</sup> parallèle, la lunette du T3 est inclinée seulement de 12° ce qui permet de réduire l'influence de certaines erreurs instrumentales. (Il faut en profiter, car dans 12 000 ans c'est l'étoile Véga, à 25 années-lumière qui indiquera le nord...). Je place ici une autre remarque. En juin, la déclinaison du Soleil vaut 23°26'. Lorsqu'il passe à midi au méridien du lieu de latitude 12° il est au nord ! C'est le cas pendant environ trois mois.

## Unités de mesure des angles

Pour le Système international (SI), l'unité d'angle plan est le radian (le périmètre d'un cercle =  $2 \pi R$  ou 2 pierres ou 2 Pierre). Laissons-le aux mathématiciens. L'unité "quotidienne", le temps, est exprimée en heures et avec ses sous-multiples bien connus : minutes et secondes ; les symboles étant respectivement : h, min, s. La Terre est découpée en fuseaux de 24 h.

Les théodolites sont gradués en degrés ou en grades.

Le cercle est divisé en 360 degrés. Les sous-multiples du degré sont la minute

sexa(gésimale) et la seconde sexa. Les symboles sont : °, ' et '' ; et les secondes sont décimales. Exemple : 30° 30' = 30,5°.

(Voilà pourquoi ces symboles sont utilisés dans les journaux sportifs, c'est plus rapide que min et s).

La relation entre heures et degrés est facile sur la Terre : 24 h x 15 = 360° ; heures et degrés, minutes de temps et minutes d'arc, secondes de temps et secondes d'arc sont dans le rapport 1 à 15. Maintenant, une autre unité qui facilite les calculs est souvent retenue : le degré décimal. 30° 30' = 30,50° et 30° 30' 30" = 30,5083° ; c'est trop facile maintenant avec les calculatrices scientifiques et les serveurs ! Il faut faire attention s'il y a des décimales de seconde.

Le cercle est divisé en 400 grades. Les sous-multiples du grade sont : le déci-grade, le centigrade, le milligrade et le décimilligrade. Les symboles sont : gr, dgr, cgr, mgr et dmgr. En écriture rapide, le cgr est remplacé par le symbole accentué : ( ' ) et le dmgr par le symbole : ( " ). Pratiquement, il n'y a pas d'ambiguïté avec les symboles, l'utilisateur connaît quand même l'unité employée. Depuis 1982, il est recommandé (obligé) de remplacer le mot "grade" par le mot "gon", avec un "g" pour "goniomètre". Et comme 360° = 400 g, 1° = 400/360 = 1,11... gr et 1gr = 360/400 = 0,9°.

Pour les petits angles, en géodésie, on convertit la seconde d'arc en dmgr : 1" = 3 " (3,086 ").

Voici l'exemple de la différence de longitude entre les méridiens de Greenwich et de Paris :

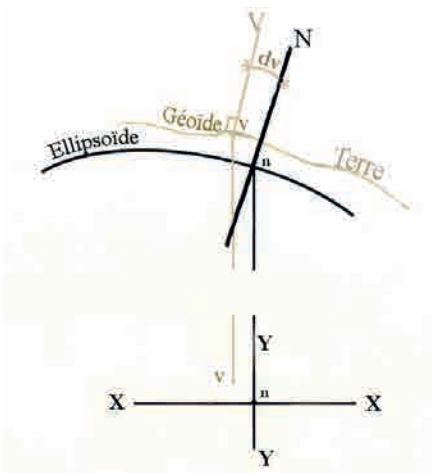
en heure : 0 h 09 min 20,935 s (valeur retenue par l'IGN) ;

en degrés : 2° 20' 14,025" soit : 2,3372(917) degrés décimaux ;

en grades : 2,5969(213) gr.

### ■ Relation entre les secondes d'arc et le mètre

La latitude s'exprime en degrés d'arc. La première définition du mètre est "la dix millionième partie du quart du méridien terrestre". Ce quart fait 10 000 km pour l'angle de 100 grades soit 100 km pour 1 gr et donc 10 m pour 1 dmgr et pour 0,3" (sexa), c'était la précision demandée pour les coordonnées géographiques.



**La longitude** s'exprime en h, min et s de temps. L'équateur mesure 40 000 km pour l'angle de 24 h soit de 86 400 s ; d'où  $1s = 40\,000/86\,400 = 0,463\text{ km} = 463\text{ m}$ , arrondis par facilité à 450 m.

Pour la latitude  $\varphi$  la valeur d'une seconde de temps est  $450\text{ m} \times \cos\varphi$  soit pour le 12<sup>e</sup> parallèle, 440 m. Et finalement 1/100 de seconde correspond à 4 m (en France, vers Bordeaux,  $\varphi = 45^\circ$  et  $1s = 320\text{ m}$ ).

**Le "nœud"** est l'unité de vitesse dans les domaines maritime et aéronautique. 1° correspond à la distance sur le globe de 40 000 km/360, soit 111,111... km.

1' vaut 60 fois moins, soit 1,852 km ou 1 852 m. Un bateau à la vitesse de 10 nœuds va à 18,52 km/h.

1 852 m est aussi l'unité du "mille marin international".

Simple, n'est-il pas !

À cette époque, les conversions se faisaient à la table de valeurs naturelles et à la calculatrice à 16 chiffres Vaucanson. Dans les années 1970, apparurent les calculatrices scientifiques (qui ne prennent pas toujours en compte les décimales de la seconde) et maintenant nous avons les serveurs par le Net... Les grades furent introduits au moment de la création du système décimal. (*Le nom "grade" est officiellement créé par le décret du 1<sup>er</sup> août 1793 ; Delambre utilisait parfois le terme "degré décimal"*). Lors de la mesure de leur méridien, Delambre et Méchain disposaient chacun de deux instruments nouveaux : les cercles répétiteurs. Sur les quatre, trois étaient divisés en grades et un en degrés. Pourquoi 400 grades et pas 100 ou 1 000 grades ? Probablement parce que les deux unités grade et degré ont à peu près la même valeur ; comme les tables en grades n'existaient pas encore, il leur fallait convertir les grades en degrés. Maintenant, nous profitons du grade ou du gon...

Et l'unité le millièm est instituée au moment de la sortie du canon de 75, en 1897. C'est une unité utile aux artilleurs car 1:1 000 correspond à un écart de 1 m à... 1 000 m.

## ■ TS GMT TU UTC

Rappel tout simple : la Terre tourne autour du Soleil ; vu de la Terre, c'est le Soleil qui tourne autour de la Terre, mais pas réguliè-

rement... Pour simplifier, la suite se réfère seulement au méridien de Greenwich (le méridien du lieu est à  $\pm \Delta M$ ).

**TS** est l'abréviation de "Temps Sidéral". Le jour sidéral est la durée de révolution des étoiles autour de la Terre. Un jour sidéral dure 23 h 56 min 04 s de temps moyen, donc les étoiles avancent de 3 min 56 s par jour de 24 h. Les documents donnent l'heure sidérale pour Greenwich (HSG) à 0 h TU ; l'heure sidérale locale (HSL) est  $HSG + \Delta M$  (longitude avec son signe + à l'est).

**GMT** est l'abréviation de "Greenwich Mean Time". Le Soleil vrai décrit une ellipse appelée "écliptique" inclinée de  $23^\circ 26'$  par rapport à l'équateur terrestre (et céleste). Donc le Soleil vrai (Sv) ne passe pas au méridien de Greenwich exactement toutes les 24 heures. Le Soleil moyen (Sm) est le Soleil fictif qui parcourt l'équateur d'un mouvement uniforme, le Soleil moyen définit le GMT. Comme en astronomie, l'angle horaire AH est nul quand le Soleil passe au méridien, il faudrait changer de jour au milieu de la journée (il est plus facile d'observer le Soleil le jour que la nuit !). Pour éviter cela, il est créé le "Soleil civil" (Sc) décalé de + 12 h.

Le **TU** (UT en langage international) est l'heure de passage, au méridien de Greenwich, du Soleil moyen plus 12 h = Sc. Souvent confondus, GMT et UT diffèrent donc de... 12 heures.

**UTC** : la comparaison des résultats entre plusieurs observatoires dans le monde et maintenant avec les satellites (précis à  $1.10^{-14}\text{ s}$ ) définit UTC : "temps universel coordonné". (Le satellite "Pharo" aura une précision de  $1.10^{-16}$  seconde, soit un écart d'une seconde au bout de... 300 millions d'années).

L'équation du temps E(t) est définie par la petite formule :  $E(t) = H\text{ du Sm} - H\text{ du Sv}$  (H pour heure).

E(t) varie, approximativement, de + 15 min en février à - 15 min en novembre ; elle est voisine de zéro aux changements de saison.

## L'équipe de géodésie

Je commence par résumer et énumérer les tâches à réaliser :

- mesurer l'angle du cheminement ;

- observer les distances zénithales réciproques et simultanées avec les équipes d'astronomie ;

- mesurer la distance au telluromètre du repère d'azimut aux points astro ;

- rattacher certains points du cheminement au nivellement de précision ;

- et bien sûr, mesurer les distances entre les sommets avec le telluromètre et avec le géodimètre.

Généralement, le point géodésique est entre deux stations astro ; mais si les côtés sont courts, deux points géodésiques peuvent être contigus. (*Exemple au prochain numéro sur schéma en fin de la 4<sup>e</sup> mission ouest*).

## ■ Principes généraux des appareils de mesure de distance

Je prends l'exemple simple du poste radio. La station choisie émet sur une certaine longueur d'onde, par exemple le slogan de France Inter était dans les années 1960 : "1 852 m grandes ondes" (1 852 m : chiffre déjà cité). Deuxième caractère : l'onde porteuse est modulée par la parole ou la musique. Les appareils de mesure de distance émettent une onde électromagnétique ou lumineuse, onde modulée par un système électronique piloté par des quartz ; l'ensemble permet les mesures avec la précision donnée par les quartz.

Longueur d'onde ( $\lambda$ ) et fréquence (f) sont liées par la formule  $\lambda \times f = C$ , C étant la vitesse de la lumière dans le vide : 300 000 km/s. (exactement : 299 792 458 m/s).

## Principe du telluromètre

Le telluromètre émet une onde centimétrique modulée par une série de quartz. Il se compose de deux postes : le premier, appelé "maître" (M) envoie un signal au second appelé "répondeur" (R) ; le répondeur renvoie le signal modifié de 1 kHz, le "maître" compare le signal émis et le signal reçu et affiche une distance. Il faut connaître la distance à 15 km près. Le premier quartz affiche la distance entre 0 et 15 km ; le deuxième affiche entre 0 et 1 500 m ; le troisième entre 0 et 150 m et le quatrième, qui permet les mesures fines, entre 0 et 15 m. Ce quatrième quartz est à la fréquence étalonnée de 10 MHz, ce qui correspond à un trajet aller-retour de 30 m et donc, à une distance mesurée de 15 m.



Le maître M transforme le signal reçu par un cercle qui se lit sur un petit tube cathodique (en haut à gauche sur la photo). Le signal émis par le répondeur se traduit par une faible coupure sur ce cercle et correspond à la lecture. La distance de 15 m se lit sur le cercle gradué en 100 parties, donc la mesure lue est connue à 15 cm. Le système est conçu pour faire tourner l'image du cercle dans quatre positions (analogie avec "cercle gauche et cercle droit") et la moyenne des quatre lectures donne la valeur de la mesure appelée "mesure fine". Cette mesure fine est répétée une vingtaine de fois en modifiant la fréquence fine ; la moyenne des 20 mesures fines donne la distance mesurée, estimée à quelques cm.

Le poste M affiche une distance qui est fonction de l'indice de réfraction dans l'air "n"; la distance est calculée par  $D = C/n$ .

En réalité, on calcule un autre indice  $N = (n-1) \cdot 10^6$  par des formules fonction des trois éléments physiques : température sèche  $t$ , température humide  $t'$  et pression atmosphérique  $pa$  ; ces trois éléments sont observés au minimum en début et en fin de la mesure globale et à chaque extrémité de la mesure. Mais les ondes électromagnétiques sont très sensibles aux conditions météorologiques, surtout à la pression de vapeur dans l'air calculée à partir de  $t'$ .

Voici un ordre de grandeur dans les conditions du 12<sup>e</sup> parallèle (par forte chaleur, en fin de mission). Si  $t$  varie de  $\pm 0,1$  degré,  $N$  varie de 0,5 unité ; si  $t'$  varie de  $\pm 0,1$  degré,  $N$  varie d'une unité ; si la pression atmosphérique varie de 1/10 mm Hg (mercure),  $N$  varie de 0,03 unité.

En résumé, le telluromètre permet de mesurer la distance pour un indice  $N = 325$  ; puis il faut calculer la distance corrigée à partir des éléments observés :  $t$ ,  $t'$  et  $pa$ .

Le telluromètre servait aussi à mesurer la distance du repère d'azimut exigé aux points astro, ainsi que la distance en cas de rattachement au repère de nivellement par nivellement trigonométrique. Il était aussi indispensable pour assurer les liaisons radio entre les deux points stationnés au moment des observations zénithales réciproques et simultanées,



Géodimètre et telluromètre vus du côté de l'observateur.



Les appareils vus de face.



La planche de 2,50 m avec les 27 prismes et le projecteur puis le telluromètre "répondeur".



ainsi que pour commander le déplacement des prismes pour la mesure avec le géodimètre. En France, nous avions essayé les appareils "ApolexTRPP1" qui portaient jusqu'à 40 km, mais ils se sont révélés limités à quelques km sur place. Donc la liaison phonique par telluromètre était indispensable.

Le telluromètre était rustique, alimenté en électricité par une batterie de 6 V, puis une boîte d'alimentation. Il suffisait de savoir changer des diodes et la résistance de 4,7 k $\Omega$  de l'alimentation, démonter et essuyer le klystron (l'émetteur) puis le remonter, avoir un petit tournevis en bois pour corriger le cercle de lecture, etc.

### Principe du géodimètre

Le géodimètre AGA 4D était l'appareil de mesure des grandes distances le plus précis de son époque. L'émetteur était une lampe à vapeur de mercure et le signal modulé par une série de quartz ; pour améliorer la précision, le signal n'était plus sinusoidal, mais devenu de forme rectangulaire par une cellule dite "de Kerr". Le tout fonctionnait sous 500 V et nécessitait donc un groupe électrogène. La mission disposait de deux AGA 4D et d'un groupe électrogène (de 110 V) fournis par les Américains. Le géodimètre émet une lumière dans le spectre visible à 550 Å (angströms), transmise par la lunette émettrice dirigée vers les prismes, lumière renvoyée par les prismes et reçue par le géodimètre dans la seconde lunette (il faut que les optiques des deux lunettes soient alignées).

Le premier quartz donnait la distance lue entre 0 et 2 000 m ; le deuxième, entre 0 et 200 m, le troisième entre 0 et 20 m, le dernier entre 0 et 2 m. Ensuite, une "ligne à retard", comme un rhéostat, donnait le 1/100 soit 2 cm. La principale source d'imprécision provenait de cette ligne à retard. Pour y remédier, au lieu de mesurer l'appoint avec la ligne à retard, on déplaçait les prismes pour lire autour de l'origine de cette ligne à retard. Les 27 prismes couissaient sur une planche en "T inversé" longue de 2,5 m et percée de trous repérés tous les 10 cm. La mesure était répétée plusieurs fois : autour du zéro de la ligne, en avançant les prismes de 10 et 20 cm, en les reculant de 10 et 20 cm.

Et pour être sûr de la précision de l'instrument, la fréquence du quartz des mesures fines était suivie en permanence pendant les observations : c'était la tâche du contrôleur américain qui vivait en permanence avec l'équipe de géodésie, mais qui ne parlait pas le français ; nous étions deux sur six à échanger en anglais.

Le principal avantage de la lumière est que l'onde est beaucoup moins sensible à la pression de vapeur que l'onde radioélectrique. Il faut bien sûr apporter les corrections météorologiques, toujours fonction des températures sèche et humide et de la pression atmosphérique. Dans les conditions du 12<sup>e</sup> parallèle, une variation de 1/10 de degré sur  $t$  ou sur  $t'$  fait varier  $N$  de 0,1 ; la variation de 1/10 de mm Hg, comme pour le telluromètre, est de 0,03. L'indice de base pour le géodimètre est  $N = 308,6$  et les formules de calcul sont plus simples.

Un côté était l'objet de quatre déterminations dans les tolérances (au  $1.10^{-6}$  D) réparties sur deux nuits.

### ■ Cas des premières mesures et quelques remarques

Pendant les premiers côtés, les deux températures ( $t$  et  $t'$ ) étaient lues sur les thermomètres, selon la méthode de l'IGN : à l'ombre d'une planchette, à au moins 1,50 m du sol si la station était au sol. Mais l'écart de la mesure entre les deux appareils pouvait dépasser la tolérance permise. Pour quelques côtés suivants, les mesures furent lues à la fois sur les thermomètres et sur les psychromètres. Surprise, les écarts étaient plus conformes avec les températures du psychromètre. Donc, ces appareils furent toujours utilisés par la suite. Le géodimètre mesurait avec la précision du millionième soit  $\pm 1$  cm pour 10 km. Selon les spécifications techniques, l'écart entre les mesures des deux appareils devait être inférieur à 10 cm +  $3.10^{-6}$  cm ; sur place, les écarts furent plus réduits, probablement après de nouveaux critères.

Les spécifications imposaient des distances comprises entre 5 et 40 km. Dans la pratique, la moyenne des distances fut autour de 15 km. Le plus long côté mesuré fut de 23 km

(première mission) et le plus court de 5,160 km (4<sup>e</sup> mission est).

À remarquer *page 63* : la planchette avec les deux thermomètres, le groupe électrogène jaune de 110 V pour l'alimentation du géodimètre, la petite bouteille à droite avec... de l'essence. Explication : plein, le réservoir ne tenait que pendant 50 min ; le géodimètre se stabilisait après 20 min environ et la mesure durait au minimum 45 min. Si le groupe s'arrêtait, il fallait à nouveau attendre quelques minutes avant de reprendre les mesures. D'où la nécessité de remplir le réservoir pendant les mesures. Le jerrican de 20 litres était à plusieurs mètres ; une fois remplie, la petite bouteille servait à compléter, avec un petit entonnoir, le réservoir du groupe, celui-ci étant en fonctionnement avec quelques vibrations. Comme les observations se faisaient de nuit, il fallait penser à descendre à temps du signal. Le sol était toujours éclairé, par une lampe à pétrole, puisque le contrôleur des fréquences observait en bas du signal (pas encore secouriste, je suivais déjà quelques notions de sécurité).

Les photos sont prises au sol, pendant un étalonnage. Le géodimètre et les telluromètres étaient étalonnés au début de la mission et à la fin ; cela ne gâchait rien de vérifier pendant. Ici n'était mesurée que la calibration : la constante d'étalonnage. Dans le géodimètre, la lumière parcourait 3 cm dans les prismes et environ 20 cm dans les optiques émettrice et réceptrice. Dans le telluromètre, le centre électromagnétique était le milieu de l'antenne. La constante d'étalonnage est la correction qu'il faut apporter à chaque mesure, c'est l'écart en cm entre le centre "électronique" et l'axe de fixation sur le support.

Maintenant, il faut s'imaginer la plateforme hexagonale du signal, avec 1,8 m entre les rambardes opposées. Cette plateforme est occupée du côté des instruments par le matériel et deux personnes puis, du côté des prismes, par la planche de 2,5 m, le telluromètre et une ou deux personnes, et toujours la nuit... Sur un signal, le géodimètre devait être centré sur le plateau à l'aplomb du repère principal. Côté "répondeur", la planche de 2,5 m était





posée sur la rambarde et elle aussi centrée et alignée. Les telluromètres étaient mis sur le plancher du signal pour assurer la liaison radio. Pour les mesures, les telluromètres étaient posés sur une planchette fixée sur la rambarde et alignés. Ils ne peuvent pas être centrés, car cette rambarde aurait perturbé la mesure.

### ■ **Journée type** (une à deux fois par mois) :

- au lever du jour, nivellement de précision en partant du repère de nivellement pour rattacher le point du cheminement le plus proche (astronomique ou géodésique) ;
- calculs dans la journée ;
- départ vers 17 h des trois équipes : une au point "M" et deux à chaque point "R" ;
- mesure des distances zénithales "au top" avec l'une, puis l'autre équipe astro ;
- mesure des deux distances au telluromètre ;
- observation des seize couples à la station ;
- mesure des deux distances au géodimètre ;
- retour au camp vers 23 heures pour le dîner.

Si deux points géodésiques se suivaient, l'équipe devait mesurer les deux angles horizontaux, les trois mesures zénithales et les trois distances (exemple sur le schéma de la 4<sup>e</sup> mission ouest, à la fin).

Toutes ces opérations étaient quand même le plus souvent étalées sur plusieurs jours, fonction de l'avancement des trois équipes d'observation et du changement de camp (l'indépendance dans l'interdépendance, bis).

### ■ **Première mission Tchad** (décembre 1966 à mai 1967)

#### Résumé en quelques chiffres

Composition : vingt-deux personnes ; commandement (J. Desudde) : quatre personnes plus un ou deux Américains ; Michel Louis, chef des travaux spéciaux, est venu pendant deux ou trois semaines pour aider à la mise en route de la mission ; reconnaissance et construction : six personnes ; astronomie : deux

équipes de trois personnes ; géodésie : six personnes IGN plus le contrôleur américain des fréquences qui vivait en permanence avec l'équipe et qui ne parlait pas le français (entre ceux qui ne parlaient pas l'anglais, les échanges se faisaient par gestes et mimiques), plus six aides africains permanents. À l'époque, j'étais le plus jeune, affecté à l'équipe de géodésie qui comprenait, heureusement, quatre "vieux broussards".

#### Travaux techniques

45 points en tout dont 23 points astro ; 32 signaux hauteur moyenne 14 m ; maxi 23 m ; Distances mesurées : 46 au géodimètre totalisant 687 km ; 81 au telluromètre pour 712 km ; en nivellement de précision : 25 km.

#### Début de la mission

Nous sommes arrivés à Fort-Lamy (ancien nom de N'Djamena) le 13 décembre 1966, vers 4 h du matin ; j'ai conservé et retrouvé mon passeport ! Quel dépaysement ! Certains avaient quitté Paris fin novembre pour la base logistique IGN de Bangui. Leur rôle consistait à transporter le matériel de campement, acheminer les véhicules et autre matériel de Bangui à Fort-Lamy et à recruter une partie du personnel local. Après quelques courtes nuits dans la capitale, le convoi est parti pour Abéché, 800 km en convoi, Noël à Abéché, puis direction Adré, à la frontière Tchad-Soudan, pour le début des travaux.

#### Les liaisons radio entre les équipes

Chacune des cinq équipes disposait d'un émetteur-récepteur, le bon vieux ANGR9. L'indicatif était "TSU" (*Tango Sierra Uniform*) suivi de trois chiffres (par exemple 270) dont le dernier correspondait à une équipe. La liaison commençait vers midi. C'était le moyen

pour que l'équipe de reconnaissance fournisse la position et l'itinéraire d'un nouveau point ; c'était indispensable pour la coordination des trois équipes d'observation et dans bien d'autres cas. Un peu avant 13 h, nous écoutions le "Jeu des mille francs", relayé par Radio Brazzaville. C'est ainsi que vers Pâques 1967, nous avons écouté le jeu enregistré à Noël 1966 ; ce jeu a bien changé 55 ans après !

**Quelques photographies, quelques souvenirs forcément personnels.**



Capitaine (pêché dans le lac Fitri ?).



Belle tortue de sable.



Le départ en convoi : 8 camions PL (T46 et T55) ; 8 PL légers ; 6 Land Rover Diesel, non visibles.



Le frigo africain (viande boucanée).

#### Exemples d'hébergement



À partir de mars : campement collectif, sous les moustiquaires pour la fraîcheur la nuit et contre les mouches la journée (la petite tente verte est celle du contrôleur américain).



Notre gîte rural au point 42, le bureau est en haut à gauche, les "chambres" sont sous l'arbre (début mars 1967). Ces cases étaient abandonnées.

#### ■ *Petits incidents techniques*

Le contrôleur américain a eu des ennuis avec son matériel électronique, ce qui a pénalisé l'avancement pendant deux ou trois semaines que l'équipe de géodésie a dû rattraper. Quelques semaines après, il a voulu aussi vérifier la fréquence fine du telluromètre maître M1, il l'a dérégulé ! Ce qui a "entraîné une modification de la fréquence, le rendant inutilisable pendant plus de quinze jours"; (écrit dans le rapport de fin de mission). À Saint-Mandé, le problème aurait été vite réglé : le laboratoire était relié directement à l'Observatoire de Paris par un signal de 1 000 Hz (avec la précision de  $1.10^{-6}$  seconde ou mieux). Sur place, après quelques jours, j'ai trouvé une solution : aligner le répondeur R1 sur le second maître M2, en bon état, sur une fréquence intermédiaire, puis échanger le M2 par le M1 en respectant le centrage, puis aligner M1 sur R1. Bien que plus compliquée à exécuter qu'à écrire, cette méthode a fonctionné, l'indisponibilité n'a duré que quinze jours !

#### ■ *Quelques anecdotes*

Fin mars, nous avons dû stationner une semaine autour d'un point d'eau qui s'est révélé contenir beaucoup de natron et qui, malgré le passage plusieurs fois dans les filtres Esser, malgré les pastilles de chlore, a soulagé nos intestins ! Un Français, que nous avions connu à Abéché, revenant de la capitale, s'est arrêté une nuit à notre camp. Nous ne devions pas être très

frais, car le lendemain il nous a laissé deux caisses de bières sur les quatre qu'il rapportait pour lui !

Deux ou trois membres de la mission, dont moi, avaient apporté leur fusil de chasse ; en plus du plaisir, c'était un complément de viande fraîche, partagé entre les équipes. Mon fusil, calibre 16, (cadeau de mes 16 ans, fils de cultivateur...) était suffisant pour atteindre les pintades qui sortaient de la brousse à la tombée du jour et se perchaient dans les arbres. Touchées, elles tombaient à terre et couraient quand même, il fallait les rattraper après une petite course, à la grande joie des enfants africains alertés par le bruit. Côté culinaire, nous ne mangions que les filets ; trop coriace du reste ! Je ne préfère pas évoquer les autres petits gibiers...

Nous changions de camp deux fois plus que les équipes d'astronomie ; le déménagement était devenu un rituel. Au sommaire : ranger le matériel technique et les imprimés ; démonter les tentes ; charger les véhicules et en dernier, arrêter le frigo à pétrole, puis déplacement au point suivant. Une fois l'emplacement choisi, le premier travail était de remettre en marche le frigo puis de monter le nouveau camp, pour treize personnes avec le personnel africain de l'équipe (6 + 1 + 6). Il fallait être très méticuleux pour s'occuper du frigo, des filtres Esser, des batteries, etc., c'était le rôle de Marcel et j'ai eu rapidement sa confiance !

À force de manipuler les thermomètres, j'étais devenu (un peu) maniaque. Voici



Dans le lac Fitri (entre Fort-Lamy et Abéché). Le fut de 200 l sur la Land n'est pas encore plein. On devine la gourde pendue à la portière. Nous n'avons rencontré que deux lacs, l'autre était beaucoup plus petit ; il ne faut pas croire que c'était pareil partout !





quelques températures vers la fin, en avril et mai. Nous commencions un peu avant la tombée de la nuit par les distances zénithales puis le telluromètre : le thermomètre affichait dans les 37° et baissait un peu la nuit. Les midis, je surveillais les 45°, mais le thermomètre s'arrêtait toujours à 44° (à l'ombre évidemment).

En fin de mission, la pluie apparaissait l'après-midi. La première fois, comme dans les films, nous en avons profité, mais pas longtemps, car la température était descendue à 24° ; il fallut se couvrir. Un midi, j'ai relevé la température d'un Ricard qui paraissait glacé : 20° ; cela montre que le frigo à pétrole (qui n'était pas un Frigidaire, mais un Ignis, belles initiales !) produisait bien des glaçons.

La boisson majoritaire était quand même l'eau. Les "anciens" m'avaient appris le principe de la gourde de deux litres : une bouteille en verre d'un litre entourée par une serpillière, une seconde identique, puis les deux entourées encore par une grande serpillière. La gourde était plongée dans de l'eau quelques minutes, puis suspendue toute la nuit à une branche ou bien accrochée à la portière du véhicule, avec le déplacement, l'évaporation produisait de la fraîcheur. Je n'ai pas pris la température, mais si la boisson à 20° paraissait glacée, celle de la gourde devait être autour de 30°. Pour éviter d'étancher la soif à la tombée du jour, le seul moyen était d'appliquer la règle du randonneur : boire avant d'avoir soif (plusieurs litres par jour, avec ou sans Antésite).



Scènes autour de l'eau (et ce ne sont pas des histoires).  
En haut : Abéché, 26 12 1966 - à droite : Ati, début mars 1967.



Les premiers aides africains.

En plus des boissons alcoolisées habituelles disponibles dans la capitale, on buvait aussi du vin et le seul qui résistait aux fortes températures était le Nabao, vin portugais qu'il fallait couper avec de l'eau. Ce vin était vendu en bonbonnes de 10 ou 20 litres, attention à ne pas les casser !



À cette époque, la sécheresse commençait à apparaître dans les zones sahéliennes. Deux anciens étaient dans le Tibesti, au nord du Tchad, vers la frontière libyenne, dix ans auparavant. Ils racontaient ne pas avoir eu de problème d'eau. Nous, nous pouvions nous déplacer vers un puits ou vers un petit lac comme le Lac Fitri. Un fut de 200 litres et d'autres de 50 litres à l'arrière de la Land Rover étaient remplis avec des seaux.

Retour sur Paris le 10 mai 1967. ●

**Rendez-vous au XYZ 172  
pour la deuxième partie  
couvrant les années 1968 à 1970.**

## Contact

Jean-Claude LEBLANC  
jc.leblanc@orange.fr



L'équipe de géodésie en fin de mission, à Massaguet (100 km de Fort-Lamy). Au bureau.

