

ÉTUDES D'HYDROL EN RÉGIONS SUBDÉSERTIQUES ET

**Study of surface hydrology in the desert
and demi-desert regions of Western Africa**

SUMMARY

The method of hydrological research previously developed by Mr. Rodier has been applied in several basins of the desert and semi-desert regions of Western Africa. The surveys undertaken and the results obtained will be rapidly dealt within the following pages.

Three programmes have been carried out in the mountain mass of the Ennedi and the Mortcha region of the Tchad in 1957, 1958, and 1959.

In 1958 and 1959 the mountain masses of Brakna and of the Tagant, in Southern Mauritania, were studied.

Finally the mountain mass of the Aïr, in the Republic of Nigeria, was the object of two programmes in 1959 and 1960.

The results of these three surveys show the great interest offered by a campaign of hydrological prospection carried out rigorously, methodically, and courageously in regions that at first present difficulties and which are particularly unfavoured. One is led to appreciate the tremendous possibilities of economic achievement and improvement of living standards which arise from the use of underground or surface waters which exist in great quantity and are capable of renewal.

Hydrologische Oberflächenstudie in wüsten-ähnlichen Gegenden und wüsten Afrikas

INHALT

Die kürzlich von Herrn Rodier entwickelte hydrologische Forschungsmethode fand ihre Anwendung in einigen Bassins von Wüsten- und wüstenähnlichen Gegenden Afrikas. Die unternommenen Studien und die erzielten Resultate werden auf folgenden Seiten schnell bekanntgegeben.

Drei Feldzüge wurden unternommen, und zwar im Gebirgsstock von Ennedi und in der Gegend von Mortcha, im Tschad, in den Jahren 1957, 1958 und 1959.

Im Jahre 1958 und 1959 wurden der Gebirgsstock von Brakna und Tagant in südlichen Mauritania untersucht.

Schliesslich waren im Jahre 1959 und 1960 der Gebirgsstock von Aïr in der Republik Niger der Gegenstand zweier Feldzüge.

Die Ergebnisse dieser drei Untersuchungen zeigen stärkstes Interesse an diesem hydrologischen Feldzug, der mit Härte geführt wurde, Methode und Mut, in Gegenden, die zuerst schwer zugänglich sind und besonders arm. Man sieht die enormen Möglichkeiten der Nutzbarmachung und Verbesserung des Lebensniveaus durch Gebrauch von unterirdischen oder an der Oberfläche fliessenden Gewässern, die in grosser Menge bestehen und verbesserungsfähig sind.

J.R.S.I.O.M. Fonds Documentaire

32732

97 A

OGIE SUPERFICIELLE DÉSERTIQUES D'AFRIQUE NOIRE

par la Section Hydrologique
de l'Office de la Recherche et Technique d'Outre-Mer

Estudio de hidrologia superficial en las regiones subdesérticas y desérticas del Africa negra

RESÚMEN

El método de investigación hidrológica desarrollado con anterioridad por M. Rodier ha encontrado aplicación en ciertas cuencas de las regiones desérticas y subdesérticas del Africa negra. Los estudios emprendidos y los resultados obtenidos serán objeto de una exposición rápida en las páginas que siguen.

Tres campañas han tenido lugar en el Macizo de Ennedi y la región de Mortcha, en el Tchad, en 1957, 1958 y 1959.

En 1958 y 1959 se procedió al estudio de los macizos de Brakna y del Tagant, en Mauritania meridional.

Por último, el Macizo del Aïr, en la República de Nigeria, ha sido el objeto de las campañas de 1959 y 1960.

Los resultados de estos tres estudios prueban el gran interés de las campañas de investigación hidrológica, realizadas con rigor, sistema y audacia en regiones en principio difíciles y particularmente abandonadas. Ahora podemos darnos cuenta de las enormes posibilidades de una nueva valoración y mejora del nivel de vida al ser posible la utilización de las aguas subterráneas o superficiales, que existen en gran cantidad y con susceptibles de renovación.



La méthode de recherche hydrologique développée précédemment par M. RODIER a trouvé son application dans quelques bassins des régions désertiques et subdésertiques d'Afrique Noire. Les études entreprises et les résultats obtenus seront rapidement exposés dans les pages suivantes.

Trois campagnes ont été menées dans le massif de l'Ennedi et la région du Mortcha, au Tchad, en 1957, 1958 et 1959.

En 1958 et 1959, les massifs du Brakna et du Tagant, en Mauritanie méridionale, ont été étudiés.

Enfin le massif de l'Aïr, dans la république du Niger, a fait l'objet de deux campagnes en 1959 et 1960.

**

ÉTUDE DU MASSIF DE L'ENNEDI ET DE LA RÉGION NORD DU MORTCHA

(Bassin du Tchad)

Le bassin versant du *lac Tchad*, d'une superficie totale de l'ordre de 2.270.000 km², présente une situation hydrologique tout à fait particulière due d'une part à son caractère de bassin fermé, d'autre part à la grande diversité des conditions climatiques qui s'y rencontrent.

Schématiquement, la partie du bassin située au sud du 11° parallèle est soumise au régime tropical, avec une pluviométrie comprise entre 1.500 et 750 mm.

Les écoulements y sont permanents, avec des étiages accusés en avril-mai et des crues de juillet à octobre. Bien entendu, la période de hautes eaux est nettement décalée par rapport au schéma-type des grands cours d'eau à faible pente tels que le Chari, le Bahr-Salamat, etc. Au fur et à mesure que l'on remonte vers le nord, la période au cours de laquelle des crues peuvent être observées se réduit pour se limiter aux mois d'août et septembre; parallèlement l'écoulement cesse en basses eaux.

En zone sahélienne, comprise entre les isohyètes 750 et 300 mm, l'écoulement est réduit à une durée d'un ou de deux mois : en août et septembre, la dégradation du réseau hydrographique devient systématique et on y rencontre de nombreuses zones d'inondation qui sont, dans certains cas, l'aboutissement final de l'écoulement qui prend

alors un caractère d'endoréisme local. Remontant plus au nord encore, on pénètre dans les zones subdésertiques et désertiques : ici, la pluviométrie peut descendre en dessous de 50 mm/an et, s'il est pratiquement certain qu'il peut pleuvoir en n'importe quel point de ces régions désertiques, il est possible également d'observer en un lieu donné des périodes sans pluie d'une ou, exceptionnellement, de plusieurs années. L'écoulement ne se produit que dans des zones privilégiées et quelques jours par an en moyenne.

A la suite des importantes études qui ont été effectuées depuis 1948 par la *Commission Scientifique du Logone-Tchad*, l'hydrologie des grands ensembles des zones tropicales et sahélienne (Chari et Logone pour la zone tropicale — Bahr-Azoum pour la zone sahélienne) est bien connue.

Ces études se poursuivent actuellement et ont été étendues au Ba-Tha et aux ouadi du Ouadaï, ce qui permettra une analyse des écoulements et du ruissellement en zone sahélienne.

Par contre, les connaissances, tant climatologiques qu'hydrologiques, pour les régions subdésertiques et désertiques, sont extrêmement réduites et les rares observations qualitatives, qu'il avait été possible de recueillir jusqu'ici sur les ouadi (1) de l'Ennedi, du Tibesti et du versant oriental de l'Aïr n'ajoutaient pratiquement rien à celles rapportées par M. Jean DUBIEF dans son « Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara ».

Pourtant, la connaissance des conditions d'écoulement de ces régions dépasse le simple intérêt scientifique que l'on peut y attacher; ces écoulements constituent le facteur dominant de la vie dans le désert puisqu'ils concentrent en quelques régions privilégiées les apports d'eau météoriques, permettant ainsi le maintien de la végétation et parce qu'ils alimentent les nappes souterraines (2).

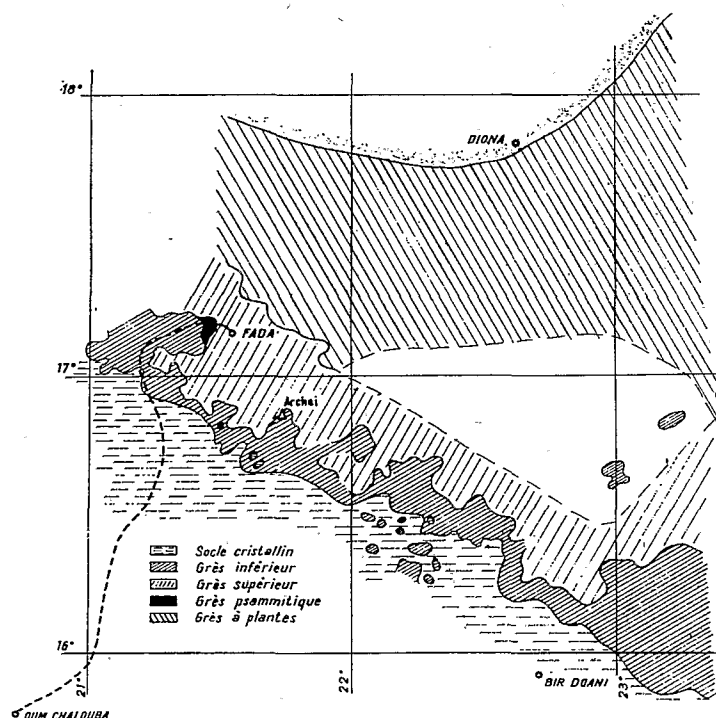
Tout projet d'aménagement ou d'exploitation minière en régions désertiques est lié aux possibilités d'approvisionnement en eau, et la connaissance des volumes d'eau qu'il est possible de prélever sur les différents types de réserve, sans rompre leur équilibre, est essentielle.

En vue de l'obtention de renseignements plus précis relatifs au phénomène d'écoulement en zones désertiques et subdésertiques, la *Commis-*



(1) Dans la suite du texte, il a été adopté, conformément à un usage ancien, pour le Mortcha le terme *ouadi* employé par les populations de langue arabe du Ouadaï et pour l'Ennedi, le terme gorane *Enneri*.

(2) En dehors, bien entendu, des nappes fossiles.



Ennedi. Croquis géologique.

sion Scientifique du Logone-Tchad a décidé d'effectuer une première campagne en 1957.

Le but de cette campagne était, avant tout, de définir les conditions et les méthodes de travail à adopter. Soulignons dès maintenant que, par suite du caractère d'exception que revêt le phénomène de ruissellement dans les régions désertiques et de l'impossibilité pratique d'y établir des réseaux d'observation serrée, il n'est pas permis d'espérer des résultats aussi complets et aussi précis que ceux obtenus dans les régions à écoulement permanent. L'objet sera ici d'établir l'allure des phénomènes et de rechercher des ordres de grandeur.

Cette campagne d'information a eu lieu de juin à septembre 1957 dans la région de l'Ennedi, choisie en raison des conditions favorables qui s'y rencontrent : l'assurance de pouvoir y observer des précipitations pendant une période de courte durée qui s'étend de juillet à septembre, laquelle se trouve liée avec l'avancée septentrionale du front inter-tropical à cette époque, et des liaisons relativement aisées avec Abéché, centre des études hydrologiques du Ouadaï. De plus, la pluviométrie de l'Ennedi et celle du Ouadaï étant commandées par les mêmes facteurs, il n'est pas exclu que l'on puisse raccorder les résultats obtenus dans l'Ennedi en zone subdésertique à ceux du Ouadaï situé en zone sahélienne.

Travaux antérieurs

L'hydrologie et la climatologie de l'Ennedi sont fort peu connues et n'ont fait, jusqu'ici, l'objet d'aucune étude particulière. Le remarquable ouvrage de M. Jean DUBIEF donne une synthèse de l'ensemble des résultats climatologiques connus pour le Sahara et rassemble la presque totalité des

observations qualitatives qui ont pu être effectuées concernant le réseau hydrographique de ces régions; mais cet ouvrage ne contient que très peu de données concernant le nord du territoire du Tchad. Les travaux du général J. TILHO, du lieutenant-colonel GROSSARD donnent des précisions sur le réseau hydrographique et rapportent quelques observations d'écoulement pour l'Ennedi. La récente étude de M. C. PERRIN DE BRICHAMBAUT parue dans le numéro de juillet 1956 de la revue *Météorologie* sous le titre « *Note sur les pluies en A.E.F.* » fait la synthèse des observations pluviométriques pour l'ensemble du Tchad.

Pour être complets, ajoutons les observations effectuées par les autorités militaires et consignées aux archives du Poste de Fada. Ces observations portent essentiellement sur les différents points d'eau de la région, puits et gueltas, et sur les erreurs de tracé du réseau hydrographique figurant sur la carte au 1/1.000.000°.

Du point de vue géographique, on dispose :

- de la Feuille Largeau,
- du croquis de l'Afrique au 1/1.000.000°, document réalisé à partir de levés itinéraires et qui, de ce fait, est assez imprécis,
- de la couverture aérienne réalisée par l'I.G.N. en 1954/55, élément essentiel de notre documentation.

Du point de vue géologique, on dispose des documents de la *Direction des Mines et de la Géologie de l'A.E.F.* :

- la carte générale au 1/2.000.000°,
- les communications effectuées aux Académies à la suite de la Mission géologique Borkou-Ennedi-Tibesti.

Depuis la parution de ces derniers documents, ce Service a assuré plusieurs missions dans ces régions; malheureusement, par suite de leurs dates récentes, elles n'ont pas encore fait l'objet de publication. Il a été possible toutefois d'obtenir directement les renseignements complémentaires intéressants.

Organisation générale de la campagne

L'objet étant de rechercher les conditions dans lesquelles des études hydrologiques de surface pouvaient être entreprises en zone subdésertique, le programme laissait une large part d'initiative à l'équipe hydrologique chargée de cette campagne.

Celle-ci était composée de M. BRAQUAVAL, Ingénieur du Service Hydrologique d'*Electricité de France*, Inspection Générale pour l'Union Française et l'Etranger, mis à la disposition de la *Commission Scientifique du Logone et du Tchad*, et de M. DOUNIE, Agent technique appartenant à cette dernière.

Après la reconnaissance préliminaire de la région de Fada, les opérations suivantes ont été effectuées :

1° Dans la zone de Fada :

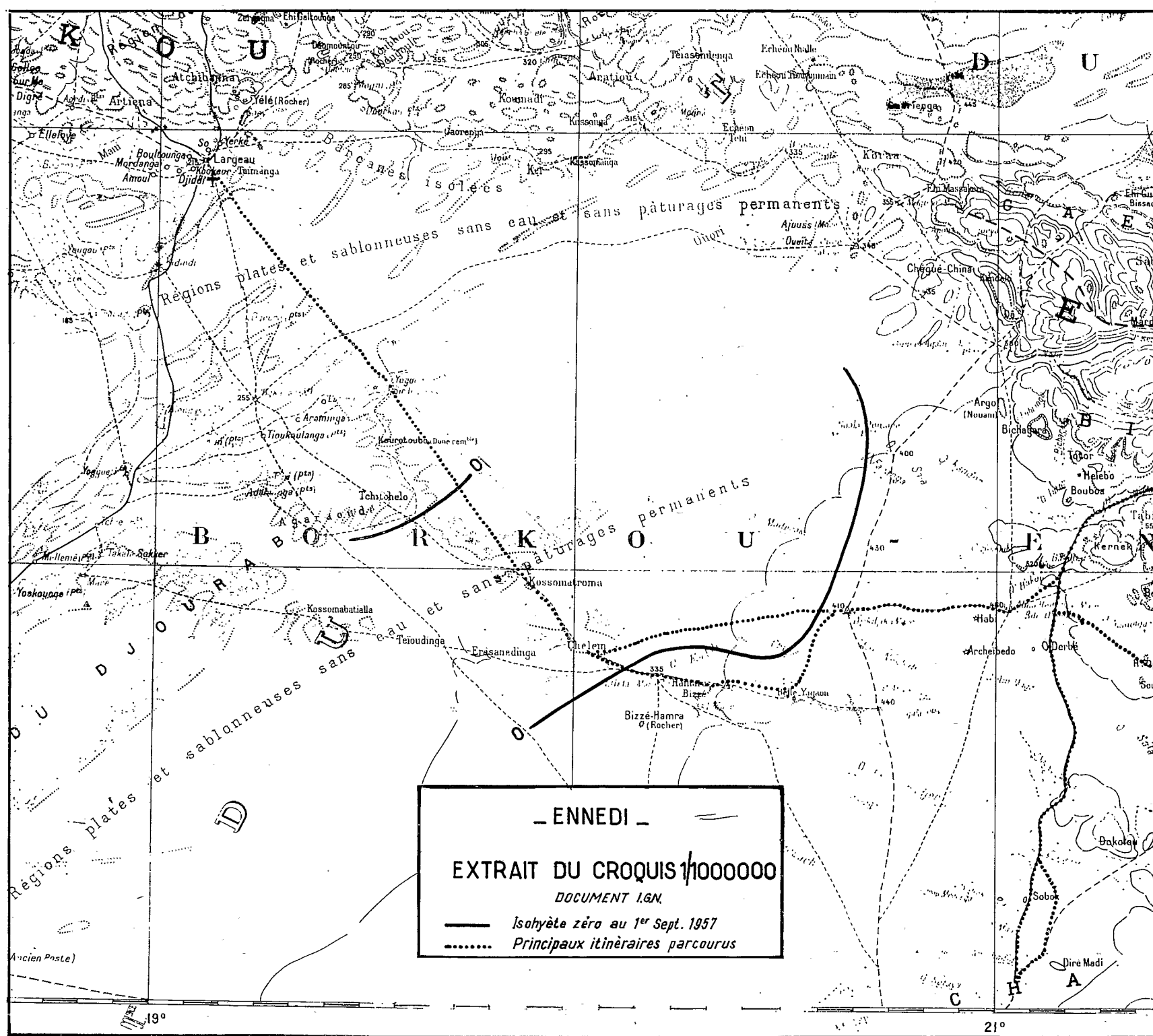
- la mise en place à Fada d'un poste d'observations climatologiques visant plus particulièrement les études d'évaporation;
- la mise en place d'un bassin versant expérimental à Kourien-Doulien, situé dans la butte gréseuse d'Erisigue à 12 km au sud de Fada;
- la mise en place de sections de jaugeages et d'un limnigraphe sur l'Enneri Aquali qui se trouve être le collecteur principal de cette région;
- la mise en place de pluviomètres totalisateurs en plusieurs points de la cuvette de Fada, en

vue de compléter les observations pluviométriques.

2° En dehors de la région de Fada :

- une reconnaissance générale du réseau hydrographique et la mise en place de pluviomètres totalisateurs.

Par suite de la courte durée de cette mission, cette reconnaissance s'est limitée, pour le massif, au bassin versant des Enneri N'Dou, Archeï, Nohi. Pour la région cristalline, située au sud-ouest du massif gréseux, quelques itinéraires ont été effectués entre Fada, Oum-Chalouba et la mare d'Ellela.



EXPOSÉ GÉOGRAPHIQUE SOMMAIRE

L'Ennedi, situé au nord-est de la cuvette tchadienne, fait partie de la région Borkou-Ennedi-Tibesti, dont le chef-lieu se trouve à Faya-Largeau et dont l'administration a été déléguée aux autorités militaires. L'Ennedi constitue un district ayant Fada pour chef-lieu, et qui comporte deux postes administratifs à Ounianga-Kebir et Oum-Chalouba.

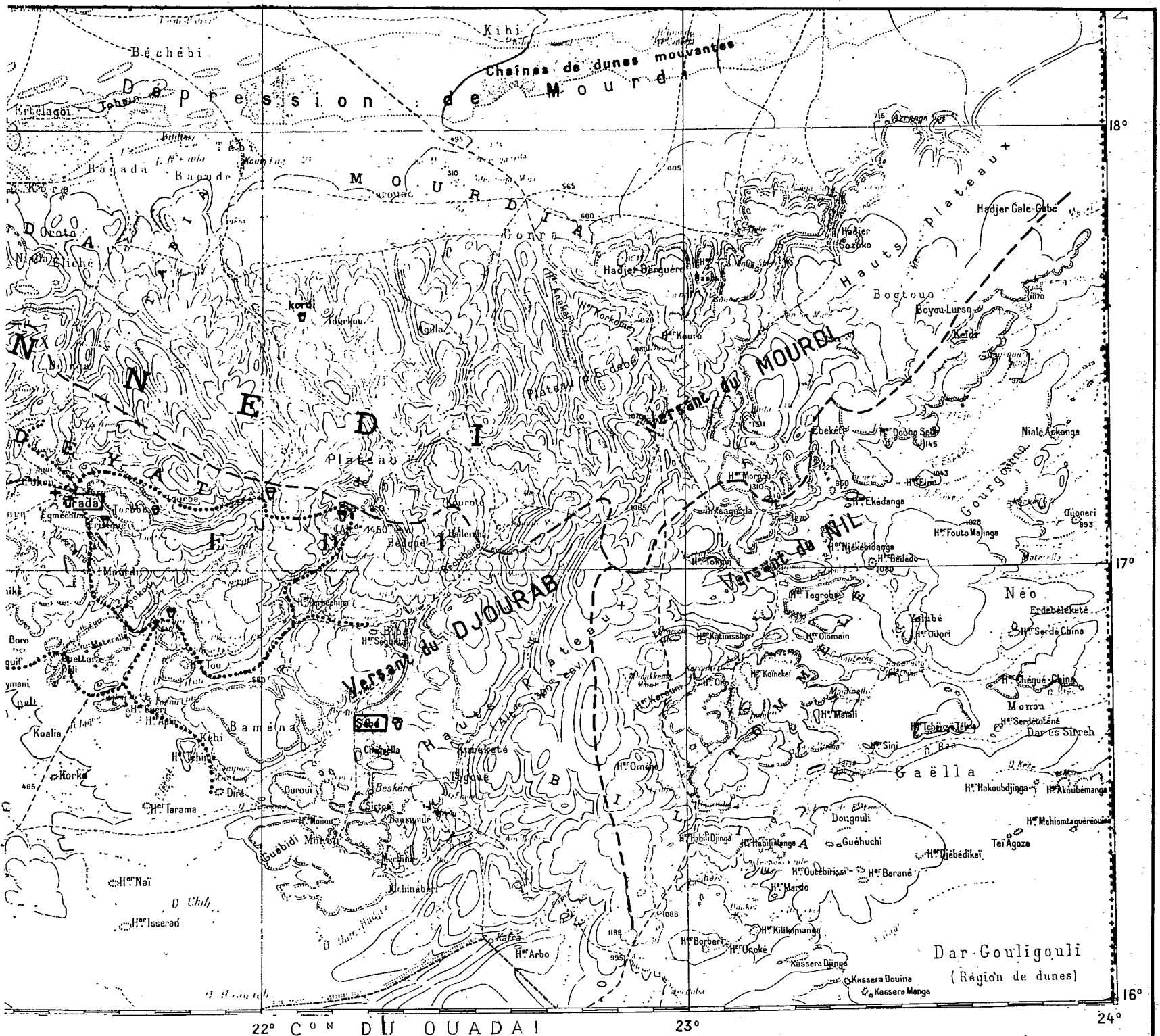
Le dernier recensement accuse une population de 19.000 habitants répartie entre différentes tribus appartenant toutes au groupe *gorane*. Toute cette population, sans exception, est nomade.

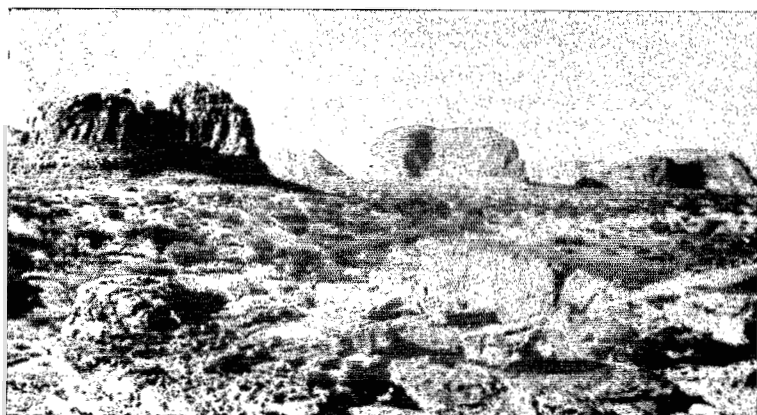
Le district de l'Ennedi comporte deux ensembles :

- le massif proprement dit,
- la pénéplaine du Mourcha au sud-ouest.

Le massif est constitué par une succession de plateaux gréseux s'étagant les uns au-dessus des autres et présentant un léger pendage vers le nord.

La forme générale du massif est celle d'un triangle rectangle dont la base orientée S.E.-N.W. se développe depuis Am-Djeres, au nord des Hadjer-Doure, à la pointe septentrionale du mas-





Hatehaye-Offro. Plaine de dégagement avec de nombreuses buttes témoins.

sif du Ouadaï jusqu'à Oueïta sur une distance de 350 km environ.

Le massif est limité au nord par la dépression du Mourdi qui le sépare de la ligne des reliefs des Erdi et des plateaux Jef-Jef constituant la limite entre le bassin du Tchad et le bassin lybien. A l'est, les reliefs du plateau d'Erdébé, extrémité orientale du massif, sont progressivement envahis et disparaissent sous les sables du désert lybico-soudanais. La superficie totale du massif, appartenant au bassin du Tchad, peut être estimée à 43.000 km².

Une coupe géologique N-S du massif montre qu'il est constitué par une importante masse gréseuse reposant sur le socle précambrien, essentiellement gneissique, et qui affleure largement au sud.

La pénéplaine du Mortcha se présente comme un vaste plateau au relief peu accusé, avec quelques buttes généralement granitiques, vestige d'un relief ancien, qui prennent l'aspect d'amoncements de pierres par suite d'une décomposition poussée de la roche (décomposition en boules). Partout ce socle est profondément altéré et la roche décomposée sur plusieurs mètres de profondeur. Le plateau est sillonné par un réseau hydrographique relativement dense, la végétation se concentrant en bordure des lits des Enneri et dans quelques dépressions, ce qui contribue à donner au paysage l'aspect d'une succession de regs encerclés par un cordon de végétation arbustive xérophile comportant essentiellement des Acacias et des Mimosées.

Lorsqu'on se déplace vers l'ouest, les zones ensablées sont de plus en plus fréquentes et l'on aboutit finalement à la région de dunes du D'Jourab.

La pente générale de la pénéplaine du Mortcha est E-W; toutefois, il existe sans doute une rupture de pente qui s'effectuerait selon une ligne dont l'origine serait située dans la région de coordonnées $x = 21^{\circ}25$ $y = 16^{\circ}30$ et dont l'orientation serait sensiblement N-W, la pente du socle au nord de cette ligne étant orientée vers le nord, le socle plongeant ainsi sous le massif de l'Ennedi.

Seul, un nivellement relativement étendu de cette région peut permettre de confirmer cette hypothèse. D'une façon générale, l'aspect morphologique est celui d'un relief ancien ennoyé dans des remblais quaternaires, et il n'est pas impossible que l'on soit en présence d'une superposition de réseaux hydrographiques correspondant à des périodes fluviales successives comme cela a pu être mis en évidence par MM. FRANCK et GUICHARD dans les régions situées plus au sud (Ouadaï).

Notons également qu'en limite ouest, sous les formations dunaires récentes du Djourab, apparaissent des affleurements d'une série continentale terminale datant du Tertiaire récent, dont l'extension dans le Borkou est considérable.

Pour le massif proprement dit, les géologues distinguent une succession de séries gréseuses reposant en discordance sur le socle précambrien et s'étagant de l'Ordovicien au Dévonien avec, à la limite nord du massif, dans la dépression du Mourdi, des affleurements de grès ferrugineux de la base du Carbonifère ainsi que des calcaires bleutés du Dinantien.

Les géologues distinguent parmi les séries gréseuses les plus anciennes :

- les grès inférieurs (Ordovicien),
- les grès supérieurs (Gothlandien),
- les grès à plantes (Dévonien).

En ce qui concerne l'Ennedi, les grès inférieurs et supérieurs ayant le même aspect morphologique, on reprendra, pour plus de commodité, les dénominations utilisées par la Carte géologique au 1/2.000.000° à savoir : série des Tassilis groupant les terrains siluriens, série continentale post-tassilienne pour la série des grès à plantes formant la partie culminante du massif.

La série des Tassilis est constituée par un grès massif blanc, à stratifications entrecroisées, et dont la cohésion interne est faible. L'altération de surface lui donne une teinte rouille. La granulométrie n'est pas uniforme et on y relève fréquemment des phénomènes de stratification torrentielle avec des lits de galets. Cette masse est traversée par plusieurs niveaux constants de grès en dalles, présentant souvent des caractères de schistosité et où on peut voir de nombreux gisements à *Harlanina*. Ces dalles présentent un faible pendage vers le nord, 2 à 3°.

En bordure sud du massif, cette série gréseuse a laissé de nombreuses buttes témoins, reposant directement sur le socle cristallin en avant d'une falaise dont le sommet est constitué d'une série de plateaux comportant de grandes surfaces de dégagement déblayées au niveau d'importantes dalles ferrugineuses et où l'on retrouve le relief en buttes témoins constituant des massifs isolés d'autant plus étendus que l'on se déplace vers l'intérieur de l'Ennedi en direction du Nord-Est.

La série continentale consiste en une succession



Baaba. Erosion éolienne.

de hautes plaines : Doinga, Biti, Basso qui, toutes, présentent une pente générale vers le nord. Sur la bordure sud-ouest de ces plaines, l'érosion a découpé un relief en digitation. Elle est composée de *grès tendres micacés* à stratification horizontale avec, toutefois, un léger pendage vers le nord. Ces grès sont profondément fracturés, et on observe généralement des cônes d'éboulis à la base du relief qui, de ce fait, apparaît beaucoup moins abrupt que celui de la zone précédemment décrite. En limite de cette série, à l'ouest de l'Aoué, on rencontre fréquemment des grès à faciès psammitique avec une morphologie très semblable à celle décrite ci-dessus; mais les vallées prennent alors une extension plus grande au détriment de la partie supérieure du relief, le caractère hautes plaines étant ici totalement absent. Cette zone constitue ainsi une transition dans l'aspect morphologique, qui passe de la surface de dégagement avec des massifs en buttes témoins à la haute plaine plus ou moins profondément entaillée par le réseau hydrographique.

Le réseau hydrographique

Lorsqu'on aborde la description d'un réseau hydrographique en zone subdésertique ou désertique, on se heurte à l'utilisation inévitable de termes ayant un sens bien défini tels que : affluent, tributaire, bras principal, chute, etc., qui, dans le cas particulier, ont perdu une grande part de leur signification et risquent de faire illusion.

Le caractère exceptionnel des écoulements qui présentent, dans le cas le plus général, des solu-

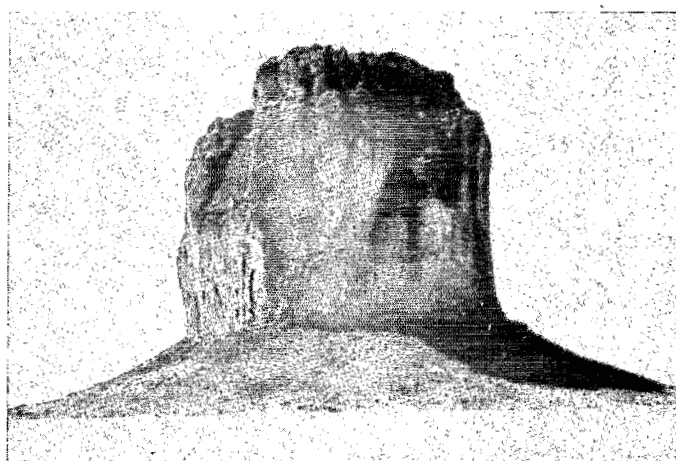
tions de continuité, fait que telle branche peut apparaître au cours d'une crue comme l'artère principale, alors qu'en d'autres occasions elle ne donne lieu à aucun écoulement. Les écoulements observés sur les différentes alimentations ne parviennent pas toujours au bras principal; dans certaines sections, on voit s'établir d'importantes zones d'épandage constituant des sortes de deltas intérieurs où les pertes considérables diminuent d'autant le débit du cours d'eau. De ce fait, les débits diminuent fréquemment vers l'aval où leur alimentation principale est essentiellement assurée par les apports des affluents inférieurs.

A cette difficulté s'ajoute celle d'une toponymie de lieux-dits qui, à quelques distances d'intervalle, attribue à la même rivière des noms différents. A cet égard, nous nous sommes efforcés d'attribuer aux différents éléments le nom le plus répandu ou relatif à une des régions caractéristiques de cet élément.

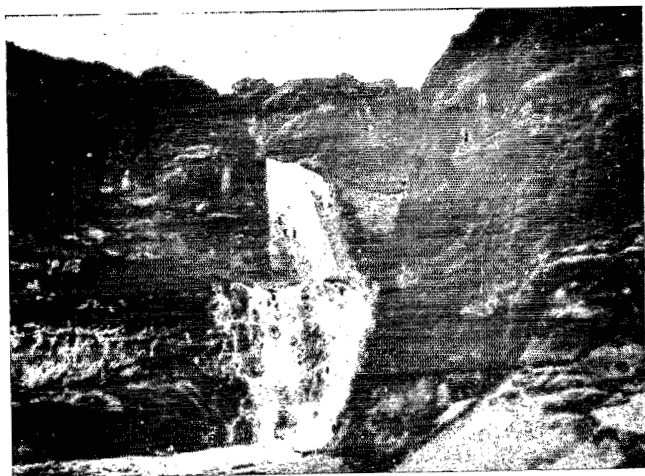
Les différents Enneri constituant le réseau hydrographique de l'Ennedi peuvent être groupés en trois ensembles selon les bassins auxquels ils appartiennent : *Nil*, *Djourab*, *Mourdi*, ces deux derniers entrant dans le bassin versant du Lac Tchad.

Le bassin du Nil groupe l'ensemble des Enneri du versant est du plateau d'Erdebe : *Enneri Bao*, *Enneri Kapterko*, *Enneri Ebetreti*, auxquels on peut ajouter l'*Enneri Hova*, en notant toutefois que la partie sud de son bassin versant est alimentée par les reliefs du Ouadai.

Le bassin du Mourdi comprend, d'ouest en est, l'*Enneri Dougoro*, l'*Enneri Kordi* et l'ensemble des *Enneri Drossou-Assoro*. Ces Enneri drainent les hautes plaines et la partie occidentale des plateaux d'Erdebe. Ces hautes plaines, au relief généralement peu accusé, présentent de nombreuses dépressions plus ou moins vastes constituant souvent de petits bassins fermés (où l'eau s'accumule après la pluie sans toutefois constituer des mares



Deli-Borotou. Erosion en pédiment à la base d'un témoin isolé.



Aoué. Crue du 26 juillet 1957.

Dans le bassin du Djourab, on distingue deux groupes :

- les Enneri ayant leur origine en bordure sud-ouest des hautes plaines, et qui en définitive aboutissent tous à l'Ouadi Saala, et que nous désignerons par *groupe de la Saala*,
- le groupe des Enneri du sud, Ouadi du Mortcha, dont l'origine se situe dans les Plateaux Biliyas, et auxquels nous rattacherons les différents Ouadi qui, sans avoir leur origine dans le massif de l'Ennedi, drainent la partie nord de la plaine du Mortcha, entre les bassins des Ouadi Oum Chalouba et Saala.

Groupe de la Saala

Les différents Enneri constitutifs du réseau hydrographique appartenant à ce groupe abou-



a) Au déversoir.

Maya. Crue du 28 juillet 1957 ;

permanentes) dont la profondeur n'excède probablement pas 50 cm.

L'Enneri prenant naissance dans ces hautes plaines voit son lit se préciser au voisinage et au franchissement des zones rocheuses, où il coule souvent dans des gorges profondes, tandis qu'il subit une dégradation rapide dans les traversées des plaines.

La végétation se concentre le long des Enneri et s'étend un peu plus largement dans les zones d'épandages à la faveur d'un sol sablonneux susceptible de constituer une réserve d'eau suffisante pour l'entretenir. Après la pluie, partout où le rocher n'affleure pas, on peut voir de très beaux pâturages. Toutefois, ces plaines ne présentent que fort peu de points d'eau permanents, et ceux-ci sont insuffisants pour l'alimentation de troupeaux importants; aussi ces plaines sont-elles très généralement inhabitées en saison sèche et utilisées uniquement en tant que pâturages temporaires en fin de saison des pluies.

b) En amont de la chute.



tissent sur la falaise terminale dominant la plaine précambienne en quatre points principaux qui sont d'ouest en est les lieux dits M'Dou, Archei, Mohi et Sini. Ces dénominations ont été adoptées pour désigner les quatre bassins principaux correspondant.

Description sommaire des différents bassins

A la chute du Hohou située à 15 km à l'ouest de Fada, l'Enneri M'Dou draine un bassin versant de 1.300 km² limité au nord par le rebord méridional de la haute plaine de Doinga, qui fait partie du bassin du Mourdi, et à l'est par la grande cassure N-S qui va sensiblement d'Archei à la limite des plaines de Doinga et de Biti.

L'amont du bassin versant se développe dans les systèmes gréseux des Tassilis. On peut y distinguer plusieurs ensembles. Le bassin versant expérimental de Kourien-Doulien situé dans la butte d'Erisigue, à 12 km au sud de Fada, appartient à l'un d'eux.

A l'aval des chutes de Hohou, l'Enneri aboutit immédiatement à un important delta intérieur où la végétation arbustive est assez dense. C'est ce delta qui est plus spécialement désigné par M'Dou.

Les écoulements ne dépassent que tout à fait exceptionnellement ce point pour rejoindre l'Enneri Saala.

Bassin versant d'Archei. Aux gorges d'Archei, ce bassin couvre une superficie de 800 km² qui draine au nord la bordure méridionale de la haute plaine de Biti, ainsi que celle du sud-ouest du Basso. Il est presque entièrement situé dans la série des Tassilis, et sa partie supérieure est découpée dans le relief post-tassilien.

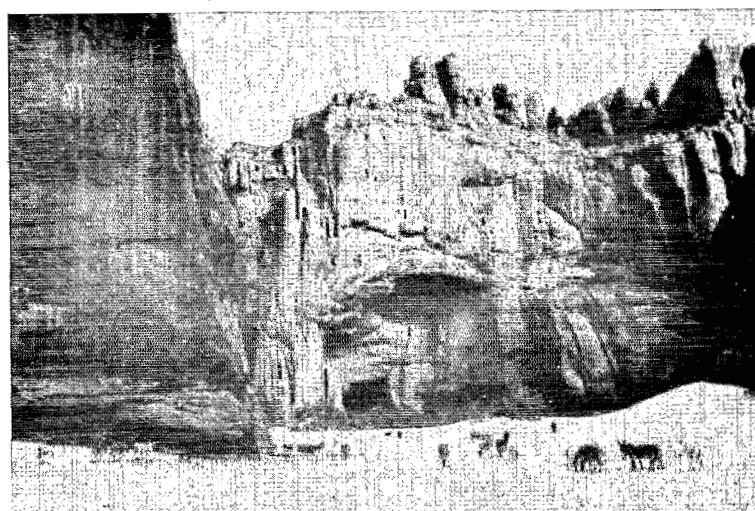
Le bassin versant de Mohi aboutit à l'aval dans la mare d'Edie au sud d'Archei, mais les écoulements qui dépassent la grande dépression intérieure de Mohi située à 20 km à l'amont de cette mare et qui forme un véritable delta sont tout à fait exceptionnels. Le bassin versant à l'amont est de 1.500 km². La totalité du bassin, en dehors d'une faible partie située juste à la limite du Basso, est constituée par des grès de la série des Tassilis.

Le bassin versant de l'Enneri Sini, non parcouru pendant cette campagne, aboutit à l'aval dans la mare de Tehime, laquelle présente deux défluent, un principal vers le nord, l'autre secondaire vers le sud-ouest.

Grotte principale à l'aval des gorges.

ARCHEI

Défilé amont des gorges.



Description morphologique

Lorsque, d'amont en aval, on parcourt les différents bassins du groupe de la Saala, divers types de vallées sont rencontrées selon la nature géologique du terrain.

SÉRIE CONTINENTALE POST-TASSILIENNE.

Après un parcours plus ou moins long, mais jamais très développé, sur le rebord méridional des hautes plaines, l'Enneri s'est creusé de profondes vallées dans la masse gréseuse. Pour toute cette partie, le réseau hydrographique est très nettement marqué et s'est conservé pratiquement dans son intégrité. La roche affleure largement dans le lit, les parties ensablées sont peu étendues, les pentes fortes. Par suite de l'irrégularité du profil, le lit apparaît après une pluie comme une succession de mares ou de gueltas. La végétation est uniquement

concentrée dans le fond de la vallée, sur les bords du lit où elle forme un cordon qui suit fidèlement les contours du torrent. La falaise, à la limite du relief en végétation qui domine la série inférieure, est franchie par une chute située au front même de celle-ci ou rejetée au fond d'une gorge entaillant profondément le relief.

Au fond de la gorge, un cordon d'éboulis aboutit au lit du torrent. Lorsqu'il coule, celui-ci se précipite au milieu d'un indescriptible chaos de blocs erratiques. Une végétation « fossile » avec de nombreux Palmiers-dattiers et Palmiers-doum a réussi à subsister en ces lieux privilégiés. En ces zones de franchissement, on relève de nombreux points d'eau : marmites de géants creusées à la base des chutes et remplies par l'eau de ruissellement (gueltas), sources dont plusieurs sont permanentes.

Lorsque la série continentale post-tassilienne prend le faciès psammitique, la morphologie est différente; l'Enneri déroule les méandres d'un lit de sable dans de larges vallées; les premiers indices de dégradation du réseau apparaissent.

La végétation xérophile reste concentrée en bordure de l'Enneri, les zones sableuses sont couvertes de pâturages appréciés par les nomades qui y viennent en fin de saison des pluies. Les rigoles de drainage du relief encadrant la vallée constituent de petits affluents dont le réseau est plus ou moins diffus, et qui parviennent rarement jusqu'à l'émissaire principal.

SÉRIE DES TASSILIS.

Les Enneri présentant un bassin suffisamment développé dans la zone précédente abordent les grandes zones de déblaiement caractéristiques de cette série après un parcours profondément creusé en gorges dans la masse rocheuse.

Lorsqu'un plateau de faible développement se trouve juste à l'amont d'une importante plaine de déblaiement, l'Enneri s'est profondément encaissé dans le plateau en creusant une gorge étroite aux parois verticales.

Dans la plaine, l'Enneri principal est tout d'abord une belle rivière de sable blanc dont la largeur peut atteindre quelques centaines de mètres; mais bientôt apparaissent les premiers indices de désagrégation avec la formation de défluent; puis la rivière se divise en plusieurs bras et forme une sorte de delta situé généralement dans une zone de confluent où la végétation, entretenue par une nappe phréatique, est abondante. Ces deltas sont des zones de puits. En aval de la plaine où généralement la roche affleure, le lit se reforme moins puissant qu'à l'origine et draine les rares eaux qui parviennent encore jusqu'à lui vers les talwegs fossiles profondément creusés dans la roche. Ainsi la végétation, dont la croissance dans le lit du fleuve ne peut plus être empêchée par les crues devenues rares et faibles

apparaît comme le facteur principal de la désagrégation du système hydrographique. Elle provoque en outre un ralentissement notable du courant favorisant les dépôts limoneux et la formation d'une nappe étendue.

Dans les zones de déblaiement, les effluents qui se sont formés sur les buttes gréseuses n'atteignent pas l'Enneri principal, et on relève même de nombreux bassins fermés, la fermeture étant généralement réalisée par un cordon dunaire.

Les buttes ont été profondément travaillées par le ruissellement; de nombreuses fractures sont ouvertes jusqu'au niveau de base, formant dans le rocher des entailles étroites aux parois verticales.

Lorsque les massifs gréseux sont suffisamment étendus, les ruissellements qui y prennent naissance arrivent à constituer des réseaux hydrographiques nettement marqués dans les zones rocheuses, plus ou moins bien conservés dans les petites dépressions sablonneuses intérieures.

En dehors de quelques buttes isolées, on n'observe guère l'érosion désertique en pédiment.

Groupe des ouadi du Mortcha

Ce groupe comprend, du nord au sud :

- la branche méridionale de l'Ouadi Saala,
- l'Oued Chili ou Kochili,
- les Ouadi Haossidinga-Hadianga,
- l'Oued Oum Hadjer,
- l'Oued Haouach.

La Mortcha offre l'aspect d'une succession de regs encadrés par des lignes de végétation avec, au voisinage des Ouadi dans les « plaines d'inondation », de nombreux pâturages. Le lit des ouadi parcourt le fond de faibles ondulations qui contournent les buttes granitiques. On observe généralement un lit mineur au tracé discontinu qui peut, sur quelques kilomètres, être bien marqué avec des berges franches de 0,50 à 1 m, pour disparaître dans des zones d'épandage en se divisant en une multitude de petites rigoles. Dans d'autres cas, les zones d'épandage sont limitées par deux branches principales du lit mineur faisant figure de drain sur l'ouadi. En crue, l'eau déborde largement de part et d'autre du lit mineur dans une plaine dont la largeur totale peut dépasser 1 km, et où la végétation est essentiellement composée de Graminées, de Pastèques et de Thalassies.

La délimitation des bassins versants est difficile, et serait pratiquement impossible sans le concours des photos aériennes.

Ruissellement

Il est acquis par tous ceux qui ont été amenés à séjourner dans la région que les Enneri de l'Ennedi coulent plusieurs fois par an, en général en août, tout au moins dans la partie rocheuse du bassin versant; que les ouadis du Mortcha coulent

au moins une fois par an en août, mais pas toujours de façon continue, et il peut y avoir des années sans eau. En année exceptionnelle, des écoulements continus sont observés sur les principaux Enneri du massif.

Météorologie

Pluviométrie

Des relevés pluviométriques ont été effectués à Fada avec plus ou moins de continuité dès la mise en place du poste militaire. Les observations sont pratiquement continues depuis 1934.

Les tableaux mettent en évidence une grande *irrégularité des précipitations* et font apparaître la période 1950-1956 comme particulièrement humide.

Il existe une différence importante entre le régime pluviométrique de l'Ennedi et celui des autres stations sahariennes, en particulier de celles du *Massif Central Saharien*.

Pour l'Ennedi, la pluie, essentiellement influencée par la *mousson*, est concentrée sur une période de courte durée, 15 juillet-15 septembre, alors que, pour les stations non soumises à cette influence, les précipitations ont lieu sur une période beaucoup plus étendue, l'hiver et le printemps pour le Massif Central Saharien.

Cette concentration dans le temps des précipitations facilite grandement les études d'hydrologie de surface.

La *hauteur moyenne annuelle des pluies*, calculée sur la période 1934-1957, est de 91 mm. La *répartition mensuelle* met en évidence deux maxima : un maximum principal en août et un maximum relatif en mai. Le maximum d'août, qui se retrouve dans les différentes stations du Tchad, correspond au maximum de la saison des pluies tropicales. Le maximum du mois de mai fait son apparition avec les stations soumises au climat sahélien.

Ces caractéristiques du diagramme de distribution mensuel de la pluviométrie s'expliquent par les deux régimes distincts de la perturbation qui sont à l'origine des pluies dans les régions se trouvant en limite de la zone d'action de la mousson soudanienne. Les plus importantes de ces perturbations sont celles liées au *front intertropical* et celles liées aux *dépansions soudanienues*.

Le *front intertropical* (F.I.T.) est la surface de discontinuité entre la masse d'air tropical continental chaud et sec de l'Harmattan (1) et la masse d'air frais et humide de la *mousson*; l'Harmattan souffle sur le versant méridional de l'anti-cyclone qui, en été, est centré sur la Méditerranée. La mousson est provoquée par la dépression thermique d'Afrique centrale, centrée durant l'été

boréal sur le Sahara, et qui provoque un appel d'air humide depuis le golfe de Guinée. La mousson joue, par rapport à l'Harmattan, le rôle de masse froide, ce qui explique que lorsque le F.I.T. se déplace vers le nord, il y a formation d'importants systèmes nuageux responsables de tornades.

Ces systèmes nuageux du type cumulus-nimbus nécessitent, pour se développer, une masse d'air humide suffisamment étendue en altitude, ce qui explique que les tornades ne s'observent en fait qu'au sud de la trace au sol du F.I.T.

La limite septentrionale des « tornades de mousson » englobe l'Ennedi, le Batha, l'Aïr, l'Adrar des Iforas et l'Adrar de Mauritanie. L'avancée maximum a lieu en août pour la zone située à l'ouest du massif de l'Ennedi.

Exceptionnellement, cette limite peut être reportée beaucoup plus au nord, et des orages prenant naissance au sein même de la mousson peuvent être observés au Borkou et même au Tibesti.

Les *dépansions soudano-sahariennes* « font la liaison entre les zones climatiques tropicales et tempérées qu'elles relient en décrivant des trajectoires très caractéristiques. Après s'être déplacées d'Est en Ouest au Soudan, dans le sens habituel des tornades soudanaises, les dépansions soudano-sahariennes infléchissent leurs trajectoires vers le Nord-Est, traversent le Sahara et, parvenues dans la zone de dépression du front polaire, poursuivent leur chemin vers l'Est, associées ou non à des dépansions européennes » (J. DUBIEF). Lorsque ces dépansions sont associées à des invasions importantes d'air humide, elles peuvent donner lieu à des précipitations. Pour la partie septentrionale du bassin du Tchad, la fréquence maximum du passage de ces dépansions se situe en mai. Les pluies de mai observées dans cette région auraient ainsi une origine identique à celle observée au printemps dans le Massif Central Saharien et l'Adrar des Iforas.

Les *précipitations*, dans l'Ennedi, se présentent sous la forme soit d'*orages locaux* de faible extension, de durée brève et dont les déplacements sont lents, soit de *lignes de grains* constituées d'orages semblant avoir chacun leur vie propre, mais dont le déplacement est régulier et relativement rapide. Il y a également quelques très faibles pluies en marge des systèmes orageux, mais qui n'interviennent que très peu dans les phénomènes d'hydrologie de surface.

Pendant la campagne 1957, des observations ont été faites systématiquement sur 16 stations réparties aussi régulièrement et utilement que possible. On a utilisé des pluviomètres totalisateurs, sauf en quelques points particuliers. Elles ont montré que les précipitations sont du même ordre de grandeur pour les différents postes. La saison étudiée ne présente aucun caractère exceptionnel et serait plutôt faible. On a également observé les trois types de précipitations cités plus haut.

(1) En hiver, l'Harmattan est relativement froid.

Température - Evaporation

Les températures sont observées à Fada depuis décembre 1955.

La température moyenne annuelle est de 28 à 29°, avec des maxima journaliers de 45 à 50° en juin, des minima de 5 à 7° en janvier.

L'évaporation est observée, également à Fada, depuis 1957 elle paraît être de l'ordre de 3.500 mm annuels.

A ces valeurs correspondent les indices climatiques suivants :

Indice de De Martonne, 1,2 environ;

Indice de classe climatique de Swain, 8,9 a (1).

Ces indices correspondent à un climat désertique.

Toutefois, il y a lieu de remarquer que l'isohyète 100 passe fréquemment au nord de Fada, et qu'en tout état de cause la partie méridionale du massif reçoit plus de 100 mm d'eau par an. L'Ennedi se situe donc en limite du climat subdésertique, dans une situation analogue à celle de l'Adrar des Iforas, des plus hauts sommets de l'Achaggar ou des régions situées au sud de l'Atlas saharien.

Il existe néanmoins, une différence fondamentale entre les régimes pluviométriques de ces régions et l'Ennedi. En effet, si pour les différents régimes sahariens la répartition des précipitations permet de distinguer une saison pluvieuse, seul l'Ennedi représente une véritable saison des pluies avec un mois d'août recevant plus de 60 % de la précipitation moyenne interannuelle.

Hydrologie

Pour la campagne 1957, un équipement sommaire permettant quelques estimations de débit avait été mis en place sur quelques-uns des principaux cours d'eau. D'intéressantes observations ont été ainsi effectuées sur les caractéristiques qualitatives et quantitatives des écoulements. Les sources ont également fait l'objet d'une étude attentive. Enfin, un petit bassin versant expérimental, celui de l'Enneri de Kourien-Doulien, de 8 km², sur la butte d'Erisigue, en bordure sud de la dépression de Fada, sur la série des Tassilis, a été particulièrement équipé et observé du point de vue des précipitations et des débits. Les conclusions de ces études peuvent être les suivantes :

Le régime pluviométrique particulier de l'Ennedi, qui donne l'assurance d'observer, sur un petit bassin, un ou plusieurs ruissellements durant la période relativement réduite qui va du 15 juin au 15 septembre, fait de cette région un cas-limite d'application pratique des méthodes d'hydrologie analytique.

Insistons sur le fait que, par suite de la nature des sols rencontrés : rocheux imperméables et sableux très perméables, la concentration dans le temps des précipitations reste néanmoins insuffi-

sante pour avoir une influence prépondérante sur les phénomènes d'écoulement.

L'application des méthodes analytiques est susceptible d'apporter de précieux renseignements en ce qui concerne les caractéristiques classiques de l'hydrologie :

- coefficient de ruissellement et d'écoulement,
- capacité d'absorption apparente.

Ces caractéristiques sont essentiellement en relation avec la nature géologique du sol; elles seront donc justifiables d'une importante généralisation, les séries gréseuses du même type que celles rencontrées en Ennedi ayant une grande extension dans l'ensemble du Sahara.

Cette première campagne a montré également que des précipitations de faible hauteur : 10 à 15 mm, et de forte intensité : 50 à 80 mm/h, peuvent donner lieu, en bassin versant rocheux, à un écoulement non négligeable, par suite d'une rétention superficielle nulle et d'une faible capacité d'absorption. Ce diagramme est le diagramme-type des précipitations désertiques.

L'alimentation des nappes phréatiques a fait l'objet de recherches particulières. Elles sont essentiellement nourries par les écoulements qui, prenant naissance dans les zones rocheuses, concentrent en quelques régions privilégiées les apports d'eau météoriques.

Ainsi, les principales nappes devront être recherchées à proximité des principaux débouchés des systèmes hydrographiques du massif, c'est-à-dire :

- en bordure sud du massif et dans le Nord Mortcha,
- à N'Dou pour l'Enneri N'Dou,
- à Archéi pour l'Enneri Archéi,
- à Tehime, Sebe pour l'Enneri Sini;
- pour la limite nord du massif,
- au débouché des principaux systèmes du bassin versant du Mourdi.

Notons que, bien que la pluviométrie diminue rapidement lorsqu'on remonte vers le nord, les apports du bassin du Mourdi peuvent être importants, les systèmes hydrographiques de ce bassin drainant la totalité des hautes plaines qui, dans leur partie méridionale, reçoivent une pluviométrie non négligeable (70 mm pour le Basso en 1957).

Pour le Massif lui-même, nous pouvons classer, *a priori*, les nappes phréatiques en deux catégories :

- a) les nappes des plaines de dépression,
 - b) les nappes des Massifs.
- a) Les nappes des plaines de dépression, sont celles que l'on observe dans les zones ensablées de ces plaines et où parviennent les écoulements ayant leur origine dans les massifs gréseux. Ce sont des régions où la végétation arbustive est importante et où de nombreux puits sont creusés (Ohouka, Aouali, Offro, Nohi). Dans certains cas, la nappe affleure (Fada).

RÉFÉRENCES	Nature du bassin versant	Surface du B.V. km ²	Débit spécifique max. probable l/s/km ²	Crues observées					
				Date	Pluie mm	Débit spécif. de pointe l/s/km ²	Débit maximum m ³ /s	K ₂ %	K %
AOUÉ (Chute)	Sol: grès à plantes - largement fracturé. Ensemblement réduit	10		26.27.7	13,5	120	1,2		15
				26.27.7	13,7	120	1,2		15
AOUÉ au confluent de N'DOULO	Pour l'amont: voir ci-dessus Pour l'aval: plaine de dégagement	12		26.27.7	13,5	37,5	0,45		
N'DOULO au confluent d'AOUÉ	Comme pour AOUÉ mais plaine de dégagement essentiellement constituée d'affleurements rocheux.	35		26.27.7	13,5	80	2,80		
MAYA (Chute)	Rocheux - grès à plantes. Pas de zone ensablée	85		28.7	17,1	305	26		55
ARCHEÏ (Chute supérieure)	Rocheux - grès à plantes pour l'amont gothlandien pour l'aval Deux plaines de dégagement AOUÉ peu ensablée AROUÉ ensablée	800	(600)			310 ⁽¹⁾	25 ⁽¹⁾		
BAABA	Comme pour ARCHEÏ. Une très vaste plaine de débâlement, très ensablée: OFFRO	450	175						
OHOUKA	Grès gothlandien Plaines de dégagement importantes (Tomba)	550		9-8		100	55,0		
ÉTERTEKOÏLE	Grès gothlandien Dépressions intérieures réduites	40	3000	8-8		375	15		
HOHOU DAHON	Grès gothlandien pour l'amont Plaine de débâlement ensablée pour l'aval	1000	50		(10)	0	0	0	0
KOURIEN DOULIEN	Grès gothlandien	8	5000	8-8	13,2	1400		30	56
				30-8	9,6	1000		32	57

Au cours de cette première campagne, nous n'avons pas étudié les variations du niveau de ces nappes. L'intérêt d'une telle étude est évident et elle devrait être entreprise dans le cas où les recherches hydrologiques en Ennedi seraient poursuivies.

b) Les nappes des massifs seraient celles hypothétiques qui s'étaleraient au-dessus d'une couche de sol imperméable.

Ce substratum, compte tenu de la formation géologique du Massif, peut être le socle précambrien sur lequel il repose, ou des bancs de grès en plaques relativement peu fracturés, partiellement schistifiés et relativement imperméables, que l'on rencontre à des niveaux constants (niveau à *Harlamia* en particulier).

L'alimentation de telles nappes serait possible par un cheminement de l'eau depuis le réseau des fractures.

Les observations faites à propos des sources confirment qu'un tel processus est possible, surtout dans la zone post-tassilienne où le réseau de fractures est relativement beaucoup plus développé que dans celle des Tassilis. Une alimentation à partir des nappes locales des dépressions ne doit pas non plus être exclue.

Remarquons que, pour la région des Tassilis, les sources se situent toujours à l'aval d'une nappe « locale », ce qui laisse supposer que, s'il existe une nappe de « massif » dans cette zone, elle se trouve reléguée à une grande profondeur. Par contre, on considère la présence de sources relativement nombreuses en bordure des grès à plantes comme un indice favorable à la présence d'une nappe dans la zone de contact des deux séries gréseuses.

Le pendage général vers le Nord des différentes couches sédimentaires implique un cheminement par gravité dans cette même direction, c'est-à-dire vers le Mourdi.

Il est encore trop tôt pour qu'une estimation précise des volumes d'eau alimentant ces différents types de nappe puisse être entreprise. Des ordres de grandeur peuvent néanmoins être avancés à partir d'une évaluation sommaire.

Ainsi, pour la nappe de Fada, le bassin de réception couvre une superficie de 200 km² (bassin versant de Sao) dont 40 % environ sont constitués par des sols rocheux identiques à ceux du bassin versant de Kourien-Doulien.

Avec un coefficient moyen d'écoulement pour ces zones rocheuses de 50 %, une pluviométrie

moyenne annuelle de 90 mm, on obtient, pour le volume d'alimentation moyen annuel, le chiffre de :

$$V = 200 \times 0,4 \times 0,5 \times 0,9 \cdot 10^{-6} \times \frac{H_u}{H_t}$$

Où $\frac{H_u}{H_t}$ est le rapport de la hauteur de pluie

utile, c'est-à-dire celle ayant donné lieu à écoulement, et H_t la hauteur de pluie totale.

H_u comprend pratiquement toutes les précipitations en dehors des pluies de marge orageuse.

En adoptant le chiffre observé au cours de cette campagne à Kourien-Doulien, on obtient :

$$V = 12 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{annuel}$$

Soulignons que ce chiffre ne représente pas un volume utilisable : une part très importante est perdue par l'évaporation dont l'action ne se limite pas seulement aux nappes d'eau libre, mais s'étend à la totalité des sols pour lesquels la nappe est suffisamment proche de la surface pour maintenir le taux d'humidité des couches superficielles.

Campagne 1958

Pour la poursuite des études en 1958, une convention a été passée entre l'Organisation Commune des Régions Sahariennes (O.C.R.S.) et l'Office de Recherches Scientifiques et Techniques d'Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.); la direction des recherches a été confiée à M. ROCHE, Ingénieur à Electricité de France, affecté au Service Hydrologique de l'O.R.S.T.O.M.

Le programme prévu était le suivant :

- installation du réseau de pluviomètres, totalisateurs du type « Association » et enregistreurs;
- installation et exploitation d'un bassin expérimental à Bachikele; relevé simultané des précipitations, des écoulements et de l'évaporation;
- observation extensive des crues du système

hydrographique des Ouadis Sini, Nohi, Archei, N'Dou et Kordi;

- reconnaissance du réseau hydrographique des Ouadis Sini et Kordi; compléments sur l'hydrographie des Ouadis du Mortcha;
- Observation des variations de débits ou de hauteurs des puits et sources du versant occidental; étude des résurgences du versant septentrional;
- poursuite des études d'évaporation à la station de Fada.

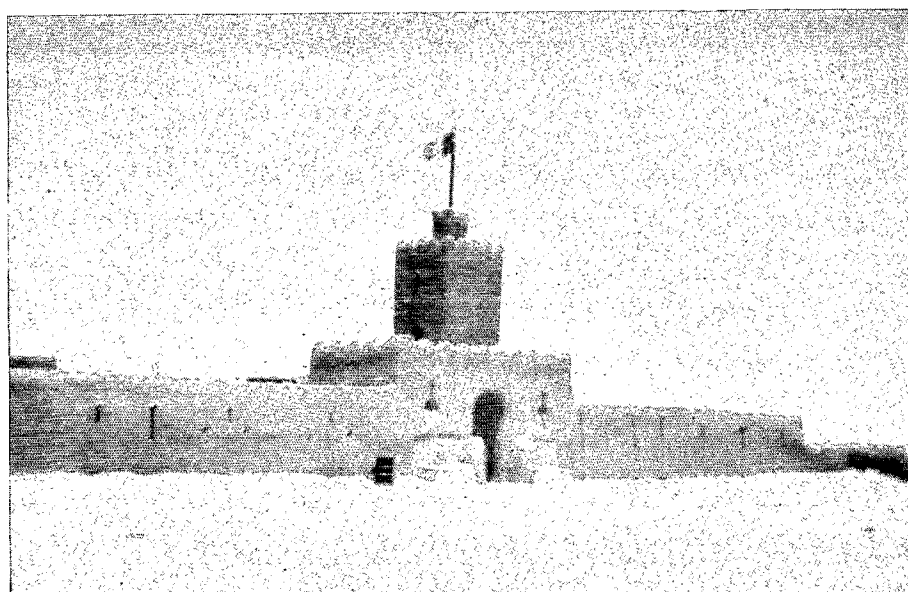
En ce qui concerne la *pluviométrie*, il semble que 1958 ait été une année relativement humide, mais la répartition des pluies s'est montrée très homogène. Pour l'*évaporation*, les valeurs, en liaison avec des précipitations plus abondantes et des températures plus fraîches, paraissent nettement plus faibles qu'en 1957.

Pour l'*hydrologie*, un nouveau bassin versant expérimental a été choisi, celui de Bachikele, qui couvre 19 km² sur les grès des Tassilis. Des jauges, et l'observation minutieuse des crues et des averses ont été effectués.

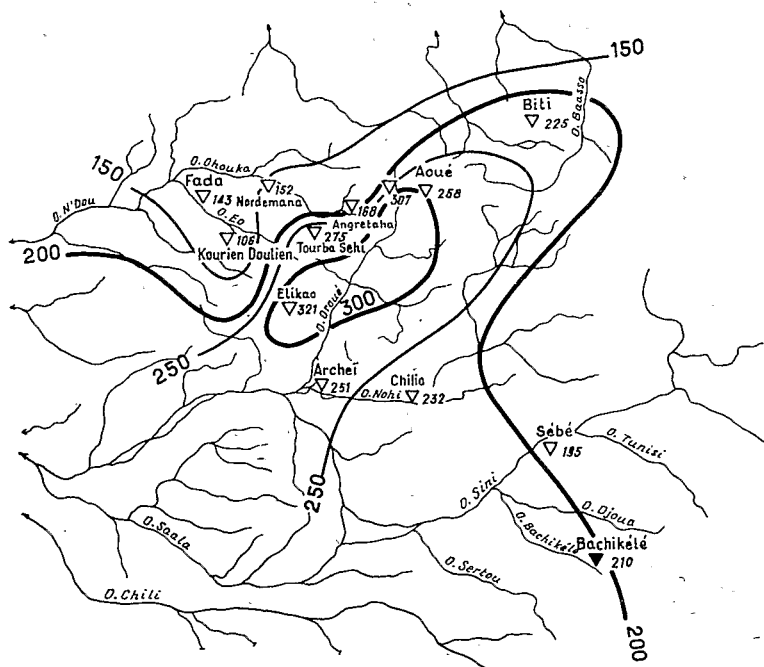
L'estimation des débits maximum en divers points du bassin (étude extensive) a également été faite.

Enfin, on a abordé sommairement le problème de l'érosion et de la circulation des eaux souterraines. La fissuration interne des grès est très importante et constitue un véritable réseau, avec de larges cavités à allure de grottes, dont l'alignement indique la présence de couches sédimentaires de moindre résistance. Certains de ces réseaux débitent après les averses.

D'autre part, on a pu constater que la circulation de l'eau dans la masse du grès, en dehors de toute fissure, est loin d'être négligeable. Des mesures sommaires ont même été effectuées, qui ont donné une vitesse de percolation d'environ 95 mm/h.



Mortcha. Oum Chalouba.



Mission **Ennedi-Mortcha** 1959.
Isohyètes 1959

Enfin, quelques observations ont été faites sur les nappes d'inféro-flux qui existent dans le lit sableux des rivières.

Les conclusions de cette campagne 1958 peuvent être exprimées de la façon suivante :

Hydrologie superficielle

On peut actuellement estimer de façon très sommaire, les débits de crues annuelles et décennales pour les petits bassins rocheux du massif. Encore est-il nécessaire d'indiquer qu'à ce point de vue il serait prudent d'observer encore pendant une année, les crues d'au moins un bassin expérimental, celui d'Aoué par exemple, afin que les données soient plus sûres.

Par exemple, l'estimation du débit maximum probable du bassin de Kourien-Doulien faite en 1957, sous toute réserve, aboutissait à des chiffres beaucoup plus faibles que ceux que l'on trouverait à partir des résultats de 1958. Une étude serrée des averses de fréquences rares serait également indispensable. Quoi qu'il en soit, on arrive à la conclusion que, sur des bassins de 10 à 25 km², le débit spécifique de crue décennale peut atteindre 8 à 10.000 l/s/km².

On a pu également dégager le mécanisme de la formation des crues sur des réseaux hydrographiques drainant plusieurs centaines de km² et obtenir quelques précisions sur les débits de crue dans les cas les plus courants.

Le volume annuel et le bilan hydrologique sont maintenant assez bien connus sur de petits bassins. Mais, par contre, il n'est pas possible de fournir des renseignements valables sur les volumes écoulés à une section contrôlant un bassin de plus de

20 à 30 km² comportant des zones sableuses. Si elle n'était pas prohibitive du point de vue prix de revient, et si les conditions d'écoulement pouvaient y être considérées comme moyennes pour l'ensemble du massif, l'étude d'un système hydrographique complet avec stations observées à poste fixe pendant toute la durée des pluies devrait être entreprise.

Hydrologie souterraine

Le problème pourrait être abordé en répertoriant d'abord tous les indices extérieurs existants :

- points d'eau (puits, gueltas, sources), permanents ou temporaires,
- zones où des puits seraient géologiquement possibles.

Ensuite viendrait une étude systématique des sables à différentes profondeurs (granulométrie, essais de perméabilité du sable mouillé). Les résultats pourraient être comparés à des analyses semblables effectuées dans le voisinage des puits existants, dont quelques-uns feraient l'objet d'essais de pompage.

Enfin, l'étude détaillée et quantitative des sources pourrait être entreprise : elle montrerait peut-être la possibilité de créer des sources artificielles.

Campagne 1959

En 1959, l'O.C.R.S. décida de poursuivre les études et passa une nouvelle convention avec l'O.R.S.T.O.M. Comme l'année précédente, la direction en incombait à M. ROCHE.

L'O.C.R.S. désirant que des études plus approfondies soient faites sur le Mortcha, le programme suivant fut établi :

- installation, à l'intérieur du massif d'un réseau de pluviomètres totalisateurs plus dense qu'en 1958;
- réinstallation et exploitation, de juillet à septembre, du bassin expérimental de Bachikélé;
- étude de l'écoulement dans le Mortcha (installation d'une station sommaire sur l'un des ouadis, essai d'établissement du bilan du bassin correspondant, étude *a posteriori* des crues des principaux ouadis);
- enquête *a posteriori* sur les crues de quelques ouadis de l'Ennedi;
- poursuite des études d'évaporation à la station de Fada.

Climatologie

Les pluies ont été particulièrement abondantes en 1959 tant dans l'Ennedi que dans le Mortcha, et des crues importantes ont été observées un peu partout. Certains pluviomètres totalisateurs ont donné des chiffres supérieurs à 200 et même à 300 mm.

L'étude de l'évaporation s'est poursuivie, et la

hauteur d'eau évaporée annuellement serait en moyenne de 4.073 mm.

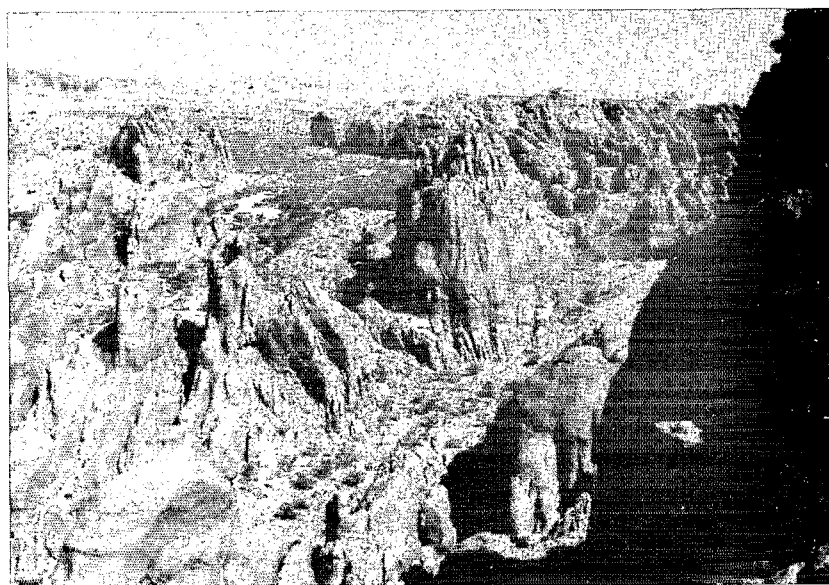
Les observations sur le *bassin expérimental de Bachikele* ont continué avec le même équipement. Les crues et les averses y ont été soigneusement chiffrées, et un essai de bilan hydrologique a pu être tenté, qui a donné les chiffres suivants :

ANNÉE 1958 :

Volume total des apports	950.000 m ³
Volume des précipitations	2.740.000 m ³ (144 mm)

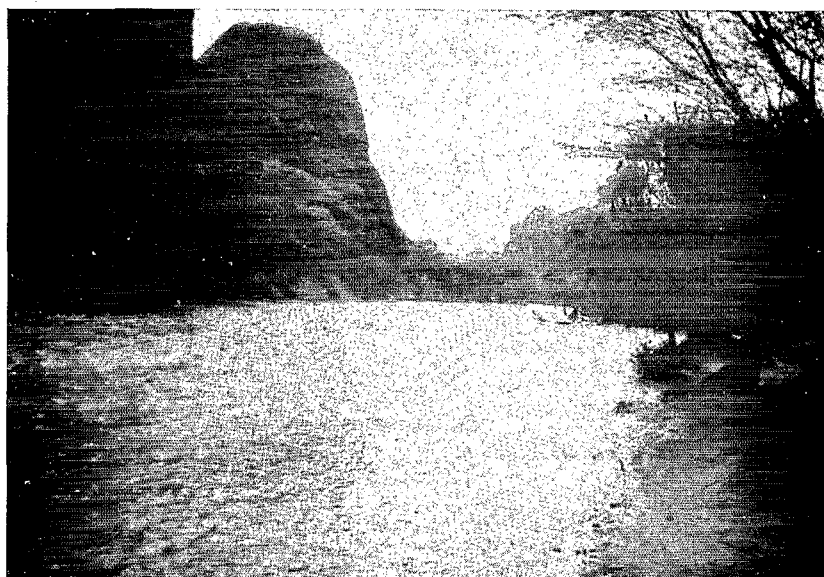
De tels coefficients d'écoulement sont assez surprenants dans une zone considérée comme sub-désertique. En fait, ils se rapportent exclusivement à des zones rocheuses sans rétention notable en surface avec restitution partielle, du reste assez faible, des eaux d'infiltration. Il suffirait de se placer à quelques kilomètres en aval des gorges pour que ces valeurs baissent de façon spectaculaire.

On voit, d'après ce bilan, que les pertes augmentent assez peu en fonction des précipitations ;



Nord-ouest du plateau.

BACHIKÉLÉ



Crue sur l'Oued.

Pertes par infiltration (pour l'année) et par évaporation (définitives).	1.790.000 m ³
Coefficient d'écoulement annuel ...	35 %

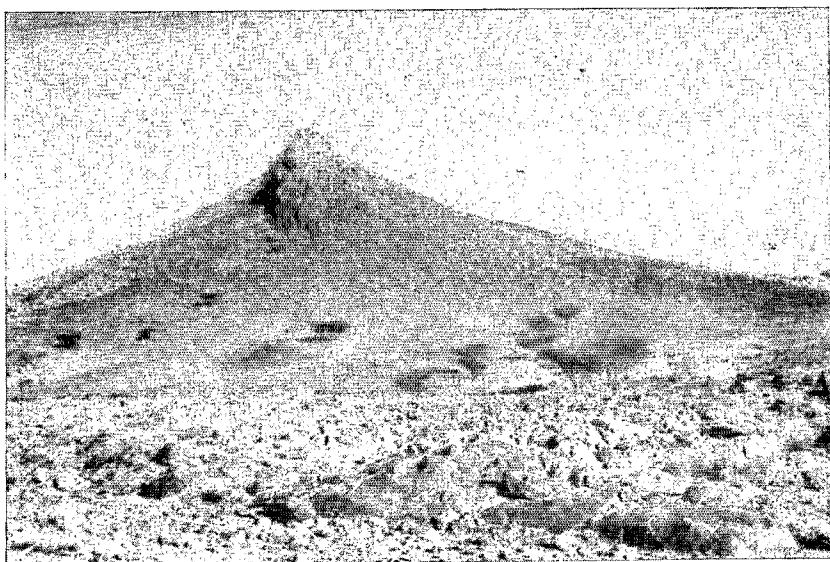
ANNÉE 1959 :

Volume total des apports	1.580.000 m ³
Volume des précipitations	3.570.000 m ³ (188 mm)

Pertes par infiltration et par évaporation	1.990.000 m ³
Coefficient d'écoulement annuel ..	44 %

en conséquence, le coefficient d'écoulement décroît très rapidement lorsque les pluies diminuent. Il serait intéressant d'examiner les bilans d'années sèches pour avoir une idée plus précise de cette variation, car les deux années étudiées sont probablement fortes l'une et l'autre du point de vue des précipitations.

Les études hydrologiques se sont poursuivies dans l'Ennedi par l'estimation de débits maximaux en quelques points (moins nombreux qu'en



Kori. Aouderas.
Chute balsatique.

A l'Ouest des falaises du Tagant et de l'Assaba, et au Nord du fleuve Sénégal, s'étend la *pénéplaine du Brakna*, envahie par les sables et les dunes, coupée par une ligne N-S de collines, ou plutôt de chaînons parallèles et disjoints, entremêlés de dômes allongés, souvent réduits à l'état de rag.

Les limites des bassins versants y sont difficiles à définir; la tendance à l'endoréisme et à la fragmentation des bassins endoréiques est manifeste. Il faut signaler que l'on trouve un peu partout des plaines, des dépressions de quelques hectares ou de quelques kilomètres carrés sans aucun écoulement ni réseau de ruissellement. En saison des pluies, l'eau y forme des mares de quelques décimètres de profondeur.

Le substratum est formé de bancs plus ou moins redressés de *roches métamorphiques*, dont les couches dures de *quartzites* ont imposé le relief actuel. Sa décomposition a donné un sable pas très abondant, et de l'argile entraînée dans les innombrables zones d'épandage où les oueds s'étendent. Les *rags*, blanc ou noir, occupent de grandes superficies.

Le schéma-type du cours d'un oued est le suivant : il prend naissance dans une cuvette plus ou moins marquée entre deux chaînons ou deux rags; il descend avec un lit net, où il peut aller jusqu'à mettre à nu des blocs d'éboulis. Lorsqu'il quitte le pédiment, la pente s'atténue, les berges diminuent de hauteur et sont constituées, ainsi que le fond du lit, d'argile sableuse et de cailloutis. La pente diminuant encore, le sable en suspension se dépose, le lit s'élargit et devient une *batha* coulant sur une couche de sable assez mince plaquée sur de l'argile sableuse. Puis la *batha* voit ses berges s'abaisser tellement que le lit disparaît en même temps que le sable; l'oued forme un épandage sur un sol argileux où l'on trouve des cha-pelets de mouilles en lignes parallèles, sans communication entre les mouilles. L'oued peut ainsi terminer sa carrière sur une petite tamourt, ou confluer avec une autre. Dans ce cas, l'on peut

retrouver une nouvelle forme de *batha* et un épandage dans une tamourt à un étage inférieur; mais si le bassin versant total est suffisamment étendu, le lit peut rester marqué sur le sol hydro-morphe.

Géologie

Ces régions n'ont encore fait l'objet que de reconnaissances assez rapides, et la géologie de détail n'y est pas très bien connue.

Elles sont essentiellement constituées par des *terrains anciens*, *Pré-* ou *Infracambrien*, formé de *quartzites* et de *schistes durs*, *Falémien* de faciès *schisteux* avec filons de *quartz*, *Primaire* (*Cambrien* et *Ordovicien*) surtout *gréseux*. Ces formations sont surmontées par l'*Eocène*, puis par le *Continental terminal*, qui existent sous forme de lambeaux et de buttes-témoins. Le *Quaternaire* est représenté par les dunes et par quelques sédiments argileux ou argilo-calcaires.

Flore - Faune

La végétation est peu variée : gros *Acacias* (*Acacia Nilotica*) le long des rivières importantes, des *Baobabs* en témoins résiduels d'une époque plus humide au Tagant, des petits *Acacias* (*A. flava* ou *seyal*), des *Combretum* à feuilles persistantes, des *Euphorbes* (*Euphorbia balsamifera*) au Tagant, des *Asclepiadacées* aphylls sur les dunes, des *Callotropis* à larges feuilles, des *Graminées* (*Aristida spicoides* sp.), des *Cram-Cram* (*Cenchrus biflorus*) sur les sables, des *Andropogon* le long des oueds, des *Pastèques sauvages* sur les dunes. Beaucoup de ces plantes sont venimeuses ou à poison instantané. Aucun arbre à fruit comestible, presque tous à épines.

Les plantes cultivées sont : le Dattier, rare dans le Tagant, le Mil et la Pastèque un peu partout.

La faune est également peu variée et rare. L'élevage concerne les chameaux, peu nombreux, les bovidés, les moutons et surtout les chèvres.

Population

La population est nomade, dans un rayon de

nomadisation réduit. Entièrement musulmane, elle comprend les *Beidanes*, d'origine arabo-berbère, et leurs serviteurs noirs d'origine soudanaise, répartis entre « captifs » et « haratines », c'est-à-dire affranchis conservant une condition de serfs. Ces derniers peuvent être de vrais sédentaires et cultivent le mil.

La population totale du secteur — relativement abondante — ne doit pas excéder 30.000 personnes pour 30.000 km². Il reste cependant des traces d'une occupation beaucoup plus importante sur un sol autrefois plus boisé et plus arrosé.

Climatologie

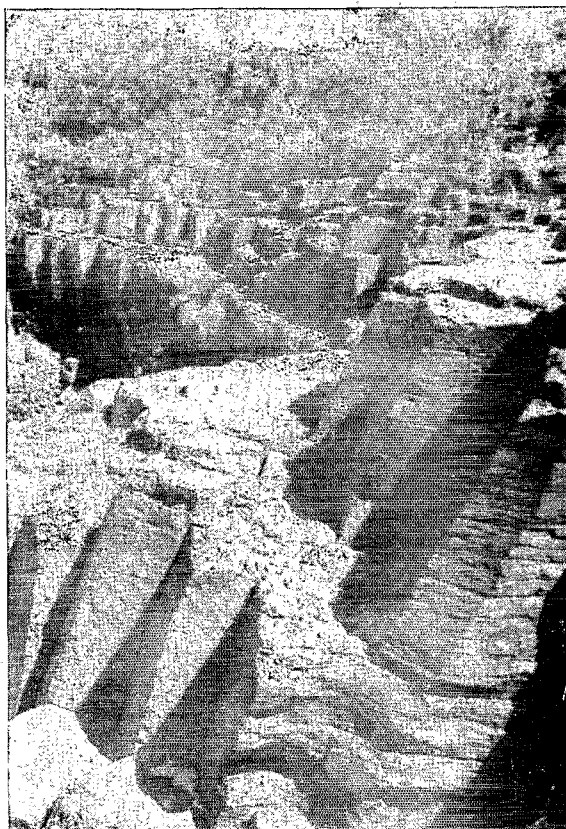
La région est située à la limite sud du régime *subdésertique*. Sa caractéristique principale est la division de l'année en une saison sèche et une saison des pluies; cette dernière dite *hivernage* dure approximativement de mai-juin à début octobre. En hiver, l'*Harmattan* souffle en permanence du Nord-Est ou du Nord; en été, la *mousson* apporte des masses d'air humide, créant le *front intertropical* (F.I.T.) à sa rencontre avec l'air tropical continental. Lorsque le front intertropical se déplace vers le Sud, il se comporte en front froid, et l'harmattan le déforme en y creusant des dépressions qui se propagent d'Est en Ouest, formant les lignes de grains appelées « tornades ».

Les températures sont assez irrégulièrement relevées depuis une dizaine d'années dans quatre stations météo : Kiffa, Tidjikja, Moudjeria, Aleg. Les maxima peuvent atteindre 45° et davantage, les minima sont aux alentours de 15°. Les mois d'hivernage se composent de journées très chaudes alternant avec des journées fraîches à chaque averse.

L'évaporation, difficilement mesurée (par suite de l'absence d'observateur en saison sèche) sur bac Colorado, doit se situer vers 3.700-3.900 mm par an. Sur un plan d'eau plus vaste, elle serait vraisemblablement de l'ordre de 2 m 25.

Etude de la pluviométrie

Les pluies ne tombent guère qu'en été. Cependant, il peut se produire quelques faibles averses entre décembre et mai. Les pluies d'été sont presque toujours annoncées par un vent de sable violent qui dure une vingtaine de minutes avant l'arrivée de la tornade. Celle-ci, très violente pendant 15 à 30 minutes, peut se prolonger en traîne de pluie fine pendant des heures. Ces averses sont très localisées. Des observations ont été effectuées par le Service Météorologique, les plus anciennes depuis 1921, malheureusement de façon très irrégulière. Dans le cadre de cette étude, de nouveaux pluviomètres ont été installés et correctement relevés. On peut dès maintenant estimer que la hauteur de précipitations moyennes annuelles serait dans le Brakna de 280 mm, et dans le Tagant de 200-220 mm, avec une forte irrégularité inter-



Filon de quartz.

annuelle. L'étude de l'intensité des averses a été également entreprise.

Hydrologie

Les recherches ont porté, d'une part sur des bassins versants particulièrement choisis comme bassins versants expérimentaux, d'autre part sur le régime hydrologique des cours d'eau du Tagant et du Brakna, dont il a été fait une étude extensive.

Bassins versants expérimentaux

Le bassin du Dionaba, entre les parallèles 17°06' et 17°15' Nord et les méridiens 12°36' et 12°44' Ouest, s'étend sur 116 km², sur des chaînons de schistes et de quartzites *birrimiens* très érodés, réduits le plus souvent à l'état de rags. Les pentes générales sont très faibles, les lits majeurs sont mal tracés. Le terrain est nu à la fin de la saison sèche, sauf quelques épineux, et se couvre rapidement, pendant la saison des pluies, d'herbes de toutes tailles. D'une façon générale, le sol du bassin est plutôt imperméable, mais, la pente étant très faible, une grande partie des eaux ruisselées est livrée à l'évapotranspiration avant d'atteindre l'exutoire. Le coefficient de ruissellement doit être plus fort au début de la saison des pluies, car la végétation herbacée a un rôle important de freinage et de rétention, surtout dans les zones d'hydrographie dégradée des affluents.

La pluviométrie moyenne interannuelle peut y être évaluée à 300 mm.

Le bassin a été équipé de 12 pluviomètres « Association », de 4 pluviomètres à augets, d'une

station météo située au Sud du bassin versant avec thermomètres, psychromètre à hélice, évaporimètre PICHE, bac Colorado, anémomètre et pluviomètres, et d'une station de jaugeage sur l'Oued Dionaba. On y a observé toutes les averses, et, en 1958, le total des précipitations était de l'ordre de 350-375 mm, c'est-à-dire sensiblement supérieur à la normale. Une des averses, en juin, a dû être voisine de l'averse décennale. Dans le domaine du possible, les crues ont été mesurées. Quelques interprétations ont été faites, d'où en particulier on peut déduire qu'une pluviométrie annuelle de 300 mm donnerait un écoulement total de l'ordre de $3,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (coefficient d'écoulement 9,6 %).

Les bassins versants expérimentaux de Séloumbo sont deux bassins contigus situés à la bordure ouest du Tagant entre les parallèles $14^{\circ}47'$ et $17^{\circ}51'5$ nord et les méridiens $12^{\circ}14,5$ ouest. A la sortie de leurs bassins versants respectifs, les Oueds Moktar et Ali se réunissent après une chute d'une cinquantaine de mètres pour former l'Oued Séloumbo qui dévale la falaise du Tagant pour se perdre rapidement dans les sables.

Ils sont situés sur un massif gréseux dont les couches subhorizontales sont d'épaisseur variable et quelquefois séparés par des passées marneuses. L'érosion les a découpés en blocs de toute taille. Le sol est formé de rags gravillonneux, et plus souvent d'argile peu sableuse. Du sable se trouve dans le lit des principaux oueds. Le réseau hydrographique est assez bien marqué, sans zones d'inondation.

Le terrain reste pratiquement nu toute l'année. Quelques Graminées poussent sur les plateaux de l'Oued Moktar. Le sol des deux bassins est très généralement imperméable, sauf dans les zones d'éboulis.

Au pied de la chute de l'Oued Ali, à la sortie de son bassin versant, existe une guelta permanente alimentée par une source (4 l/seconde au début d'avril 1959, le débit semble constant toute l'année) qui maintient constant le niveau de la mare. Celle-ci perd un peu d'eau par évaporation, davan-

tage par inféro-flux entre les blocs du lit de l'oued. Elle doit être alimentée par un réseau de failles dans les grès de l'étage supérieur, qui ne sont pas horizontaux, mais un peu redressés, failles drainant les sables du cours inférieur de l'Oued Ali. On suppose que ces derniers sont alimentés par les écoulements de l'oued beaucoup plus que par les pluies.

La pluviométrie moyenne interannuelle peut être prise égale à 230 mm.

Le bassin versant nord, celui de l'Oued Moktar, est équipé de 8 pluviomètres « Association » irrégulièrement répartis, 1 pluviographe à augets à peu près au centre du bassin, une station de jaugeage.

Le bassin versant sud, de l'Oued Ali, est équipé de la même façon. En outre, sont communs aux deux bassins, sur leur frontière commune, deux pluviomètres « Association » et une station météo complète.

Averses et crues ont été observées. Les chiffres suivants ont pu être déterminés pour 1958 :

Oued Moktar :

Pluviométrie	255 mm
Ecoulement	32 mm
Coefficient d'écoulement	12,5 %

Oued Ali :

Pluviométrie	265 mm
Ecoulement	30 mm
Coefficient d'écoulement	11 %
Pour l'année 1957, on avait eu :	

Oued Moktar :

Pluviométrie	210 mm
Ecoulement	22 mm
Coefficient d'écoulement	10,5 %

Oued Ali :

Pluviométrie	90 mm
Ecoulement	17 mm
Coefficient d'écoulement	9 %

L'année moyenne correspond à un total de 230 mm, à mi-chemin entre les deux années d'ob-



Village de Timia.

servation. Les valeurs possibles des coefficients d'écoulement seraient :

<i>Oued Moktar</i>	11,5 %	soit $340 \times 10^3 \text{ m}^3$
<i>Oued Ali</i>	10 %	soit $260 \times 10^3 \text{ m}^3$

Des études extensives ont été amorcées sur les principaux oueds et des interprétations des chiffres obtenus ont été tentées; mais les bases ont un caractère trop imprécis, qu'il s'agisse d'évaluation des crues, de niveaux maxima atteints par des mares fermées, de données pluviométriques. Tout essai de synthèse ou de généralisation serait donc prématuré.

La campagne dans le Brakna et le Tagant s'est poursuivie en 1959 sur les mêmes bases.

L'auteur a entrepris l'étude de la corrélation du total pluviométrique d'une année et la pluviométrie journalière maximale de la même année, et remarque que, dans un petit bassin versant, l'hy-

draulicité annuelle dépend beaucoup plus de la répartition des averses que du total de la saison des pluies.

Dans le bassin versant expérimental de Dionaba, de nouveaux résultats ont été obtenus par la station météo, en particulier pour l'évaporation. L'équipement du bassin a été complété par l'installation de nouveaux pluviomètres et le perfectionnement des stations de jaugeage.

La pluviométrie moyenne a été, pour 1959, de 226 mm et le coefficient d'écoulement global de 8,7 %. L'année est déficitaire.

Des travaux du même ordre ont été poursuivis sur les bassins expérimentaux de Séloumbo (oued Moktar et oued Ali). L'évaporation sur bac Colorado enterré a pu y être chiffrée à 4 m environ.

Enfin, les études extensives sur les principaux oueds ont confirmé que l'année 1959 était une année sèche, de probabilité environ 1 an sur 10.

ÉTUDES D'ÉCOULEMENT DANS LE MASSIF DE L'AÏR (Niger)

Alimentation en eau de la zone des grès d'Agadès

Par conventions passées d'une part avec l'*Organisation Commune des Régions Sahariennes* et, d'autre part, avec le *Ministère des Travaux Publics de la République du Niger*, l'*Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer* s'est engagé à effectuer, en 1959, une campagne d'études hydrologiques dans le massif de l'Aïr.

Le problème posé est l'étude des écoulements dans le massif et, par suite, l'alimentation de la nappe aquifère de l'Ouest-Aïr. Cette nappe se situe dans les séries sédimentaires gréseuses plongeant sous les argilites de l'Irhazer.

L'alimentation se fait depuis les affleurements gréseux situés au contact du socle *précambrien* constituant le massif de l'Aïr à partir des ruissellements prenant naissance dans le massif.

Le programme établi en accord avec l'O.C.R.S. et le Ministère des Travaux Publics de la République du Niger était le suivant :

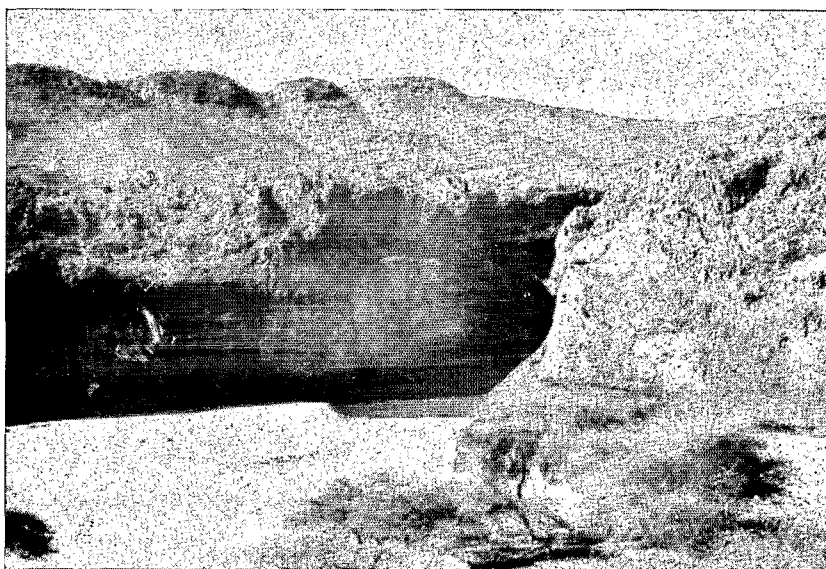
— étude de la pluviométrie du massif;

- étude sommaire du réseau hydrographique de l'Aïr;
- étude du ruissellement sur des bassins versants expérimentaux de quelques kilomètres carrés;
- étude du ruissellement des Koris Teloua à la sortie du cristallin et El Meki au village d'El-Meki;
- estimation des volumes ruisselés dans l'ensemble du massif;
- études annexes : débits solides, variation du niveau de quelques puits, mesures d'inféflux, etc.;
- études d'évaporation.

Travaux antérieurs

L'hydrologie et la climatologie de l'Aïr sont fort peu connues et n'ont fait, jusqu'à présent, l'objet d'aucune étude particulière.

Le Service Météorologique du Niger a installé des postes pluviométriques, puis climatologiques, à



Chute de Timia.

Agadès et à Ifrouane : on possède des relevés pluviométriques de ces stations respectivement depuis 1921 et 1940. Enfin, une station pluviométrique fonctionne depuis 1956 à El Meki.

Du point de vue géographique, on dispose :

- de la Feuille d'Agadès au 1/1.000.000^e,
- de la couverture aérienne réalisée par l'Institut Géographique National en 1957-1958, élément essentiel de documentation.

Du point de vue géologique, ont été consultés le « Rapport de mission géologique et minière dans l'Aïr » de M. RAULAIS (1951), ainsi que d'une esquisse géologique de l'Aïr au 1/1.000.000^e et de cartes au 1/200.000^e.

Programme et organisation de la campagne

Le programme prévu était le suivant :

- installation d'un réseau de pluviomètres : enregistreurs « Association » et totalisateurs dans le massif de l'Aïr (versant Ouest), et plus particulièrement sur le bassin versant du Kori Teloua ;
- installation et exploitation de trois bassins versants expérimentaux à Razelmamoulmi, 30 km au nord d'Agadès ; les superficies de ces bassins sont de 0,55 km², 1,81 km² et 2,11 km² ; l'étude sur le terrain comporte les relevés simultanés des précipitations et des écoulements ;

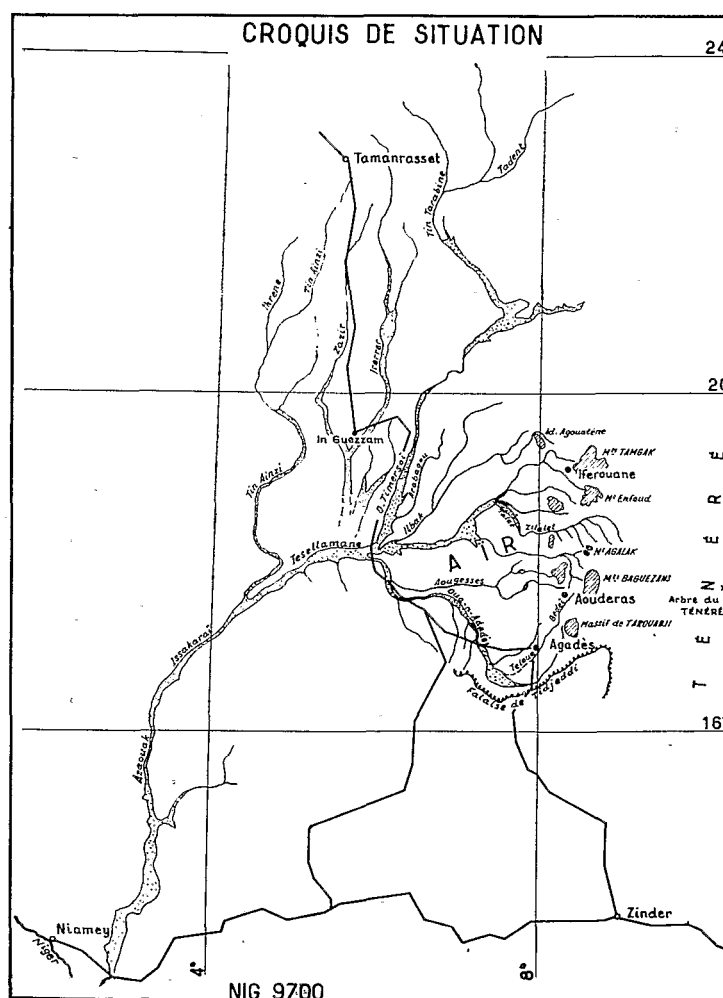
- installation de stations hydrométriques sur les Kori Teloua et El Meki : échelles, limni-graphes, sections de mesures ;
- étude extensive des crues sur les principaux réseaux hydrographiques de la partie Ouest de l'Aïr : échelles à maximum ;
- mesures d'inféro-flux dans le Teloua à Razelmamoulmi ;
- mesures des débits solides du Teloua ;
- variation des niveaux dans la plaine alluviale,
- mesures d'évaporation à Ifrouane.

L'exécution de ce programme a été confiée à M. LEFÈVRE, Ingénieur à l'O.R.S.T.O.M., assisté de M. SABATIER, agent technique hydrologue.

Géographie et Géologie

Le Massif de l'Aïr a la forme d'un quadrilatère compris entre les 17° et 21° parallèles nord d'une part et les méridiens 7° et 10° est d'autre part. La superficie de cet ensemble est d'environ 70.000 km². Toutefois, la région étudiée se limite au seul versant ouest, s'arrête approximativement au 19° parallèle et couvre une surface d'environ 27.000 km².

L'Aïr, en grande partie formé de granites anciens précambriens, présenterait dans l'ensemble des formes assez molles. Toutefois, une série de massifs de jeunes granites, approximativement alignés N-S, donne quelque vigueur à ce relief, avec des sommets atteignant 1.900 m. D'assez nom-



breux volcans donnent au paysage une allure caractéristique.

A l'ouest du massif, le socle précambrien est recouvert par les *grès d'Agadès*, eux-mêmes surmontés par les *argilites de l'Irhazer*.

Le versant ouest est drainé par un nombre important de koris (rivières), de direction générale E-W, qui convergent dans la région d'In Abangarit pour former l'In Azaouak.

En dehors des habitants des quelques villages permanents, la population Touareg de l'Aïr est essentiellement nomade.

Une description géologique plus détaillée ferait ressortir la présence d'une *série granitique ancienne* d'âge *précambrien* et d'une *série granitique jeune*, de *roches métamorphiques*, orthogneiss, migmatites, ectinites, et de produits de l'*activité volcanique*, bombes, lapillis, pouzzolanes, ponces, émis par des cratères de type strombolien ou vulcanien, de laves basaltiques, d'extrusions trachytiques ou rhyolitiques. L'activité volcanique paraît dater surtout de la fin du *Tertiaire* et du *Quaternaire*, certaines rhyolites pouvant cependant être antérieures aux *grès du Continental Intercalaire*.

La *végétation* est très clairsemée et n'offre guère d'obstacle au ruissellement. Sur le massif, la roche est presque toujours à nu, seules subsistent quelques plantes herbacées dans les infractuosités et, plus rarement, de petits épineux. Les zones de piedmont sont parfois couvertes au mois d'août de Graminées de faible hauteur et de faible densité.

Le long des koris, par contre, de très beaux arbres : Acacias, Palmiers-doum, Tamaris, bordent les berges dans les sections où la dégradation hydrographique ne s'est pas encore fait sentir. Les grandes plaines d'inondations et les zones très dégradées sont souvent couvertes d'herbes et on y rencontre des groupements de *Callotropis*.

Les *réseaux hydrographiques* sont importants. Les koris qui drainent le versant occidental de l'Aïr sont nombreux, leur direction générale est sensiblement E-W, sauf pour la partie sud de l'Aïr où ils coulent suivant une direction variable entre NE-SW et N-S.

Tous ces koris peuvent être groupés en plusieurs ensembles dont les collecteurs principaux confluent pour former à 200 km à l'ouest de l'Aïr ce qui a été autrefois un grand fleuve : l'Azaouak, lequel reçoit aussi les oueds du versant méridional de l'Ahaggar.

La vallée inférieure de l'Azaouak se poursuit par la dépression du Dallol Bosso pour rejoindre le Niger.

De façon générale, le réseau hydrographique de la partie occidentale de l'Aïr, au sud de Zilalet, est tout à fait remarquable par sa vigueur : la dégradation hydrographique est assez faible jusqu'à une distance marquée du massif. L'écoulement, en période de forte crue, se prolonge sur de très grandes distances. Ce réseau paraît être le plus vivant

parmi tous ceux que l'on rencontre dans les massifs au sud du Sahara. Cela tient sans doute à la pente forte et régulière des profils en long, à la faible extension des zones très perméables et à la hauteur relativement forte des précipitations annuelles : 100 à 200 mm.

Climatologie

Le régime des précipitations est, ici également, commandé par les deux types de perturbations qui sont à l'origine des précipitations dans ces régions se trouvant en limite de la zone d'action de la mousson.

Les plus importantes de ces perturbations sont celles liées au *front intertropical ou F.I.T.*; une deuxième série est en relation avec les *dépansions soudano-sahariennes*.

Les précipitations se produisent sous la forme d'orages locaux, de lignes de grains ou de pluies de mousson non orageuses, d'intensité faible ou modérée, mais continues pendant plusieurs heures.

Des relevés pluviométriques sont effectués par le Service Météorologique du Niger à Agadès, Ifrouane et El-Meki. On dispose à Agadès de 37 années d'observation. En ce qui concerne les *hauteurs de précipitations annuelles* moyennes brutes des observations à Agadès et à Ifrouane sont les suivantes :

Agadès . . . 167,2 mm pour 24,1 jours de pluie
Ifrouane . . 63,5 mm pour 13,8 jours de pluie

Entre les deux stations, le régime saisonnier des pluies est assez comparable, mais les hauteurs d'eau obtenues sont très différentes : Ifrouane reçoit deux fois moins d'eau qu'Agadès. El-Meki, observé depuis 1956 seulement, semble subir un régime voisin de celui d'Agadès.

L'*irrégularité interannuelle* est grande, avec 287 mm pour les années les plus humides (1953 et 1958) et 55 mm pour l'année la plus sèche (1948).

La répartition mensuelle des pluies fait ressortir l'existence d'un maximum en juillet, août et septembre.

La campagne d'étude de 1959 a augmenté le réseau météorologique par l'installation de 4 pluviographes et de 18 pluviomètres totalisateurs qui a permis l'observation précise de toutes les précipitations (répartition, durée, intensité).

Les *températures* varient entre un minimum de l'ordre de 7° en décembre-janvier et un maximum de l'ordre de 41° en mai-juin.

L'*évaporation* est mesurée à l'évaporomètre PICHE à Agadès et à Ifrouane, et se situerait autour de 4 000 mm annuels. Ces observations doivent être complétées par celles effectuées sur bac Colorado.

Hydrologie

Trois *bassins expérimentaux* ont été choisis à proximité du village de Razelmamoulmi à 30 km d'Agadès :

- l'In Tiziouen à la station principale, de superficie 1,81 km²,
- l'In Tiziouen, en amont du confluent avec l'Ourtoumez, superficie 0,55 km²,
- l'In Azena, de superficie 2,11 km².

Ces koris se jettent dans le Teloua en aval du village.

Ils sont situés dans la zone des *granites anciens* du Sud-Ouest de l'Air, granites à biotite souvent décomposés et donnant dans les dépressions des accumulations d'arènes granitiques. D'énormes filons de quartz ont rempli les fractures du granite. Les sols sont inexistants.

La *pluviométrie moyenne annuelle* comparable à celle d'Agadès peut s'estimer à 167 mm.

Un équipement pluviométrique complet a été installé, avec un pluviographe au centre du bassin d'In Tiziouen 1, un autre pluviographe au centre du bassin d'In Azena et neuf pluviomètres « Association ».

Enfin des aménagements ont été opérés pour permettre des jaugeages sur chacun des oueds ou portion d'oued.

Les bassins du Kori Teloua et du Kori d'El-Meki ont aussi été équipés et observés, et des études extensives ont été entreprises sur les autres koris de l'Air.

En annexe, on a tenté d'évaluer la quantité des transports solides, de mesurer les vitesses de l'inféro-flux par injection d'eau salée (on a obtenu le chiffre approximatif de 0,75 m/heure pour une nappe d'eau à 0,50 m de profondeur dans un oued dont la pente est de 2,5 m par km); les variations de niveau des puits ont été suivies de juillet à octobre.

Conclusion

Les observations de la campagne 1959 ont permis de dégager un certain nombre de caractéristiques hydrologiques sur l'ensemble des koris qui drainent le versant occidental de l'Air.

Les principales ont été portées sur le tableau ci-dessous. Les débits s'affaiblissent de façon géné-

rale de l'amont vers l'aval, les stations ont été classées dans l'ordre des superficies croissantes.

L'hydraulicité de l'année 1959 étant un peu supérieure à la moyenne, on doit admettre que les chiffres de la quatrième colonne sont légèrement plus forts que les moyennes interannuelles du coefficient d'écoulement. Malgré cette réduction, débits de crues et coefficients d'écoulement restent très élevés, bien supérieurs à ceux qui avaient été constatés jusqu'ici dans le massif de l'Ennedi ou en Mauritanie. Ceci est surtout net pour le Teloua, favorisé par des précipitations relativement abondantes : 150 mm par an, en moyenne, l'Afarak et l'Agandaouine. Jamais dans l'Ennedi un bassin de 1.000 km² n'admettrait un coefficient d'écoulement de l'ordre de 20 % ; tout au plus trouverait-on de 2 à 5 %. Ici les cours d'eau du massif fournissent à l'extérieur des apports non négligeables.

Les débits de crues sont également élevés : il semble que, pour le bassin standard de 25 km², la crue décennale pour des terrains du genre de l'Afarak ou de In Tiziouen atteindrait facilement 10.000 l/s/km².

Ce fort ruissellement tient à des terrains *un peu* moins perméables que ceux qui ont été étudiés jusqu'ici, à une forte pente du sol et surtout à la nature morphologique particulière des vallées : leur profil en long, au lieu de présenter des paliers et des marches comme c'est le cas souvent dans des grès genre tassili, présente une pente *continue* et assez forte : *la dégradation hydrographique est faible*. Elle est pratiquement inexistante sur le Teloua jusqu'aux abords d'Agadès, alors que souvent, sur des cours d'eau de cette importance coulant dans d'autres régions désertiques, on rencontre des deltas intérieurs où les crues des parties amont se perdent en grande partie.

Quelle quantité d'eau ces koris peuvent-ils apporter dans la plaine et dans les nappes souterraines de cette plaine?

On a vu que l'alimentation des nappes aquifères situées à l'Ouest du Massif de l'Air se fait depuis les affleurements de grès (d'Agadès) situés au

Station	Surface du bassin (km ²)	Crue spécifique maximale en 1959 (l/s/km ²)	Coefficient d'écoulement annuel en 1959 (%)	Crue spécifique décennale (l/s/km ²)
In Tiziouen 2.....	0,55	13.800	35	27.000
In Tiziouen 1.....	1,81	8.350	25	18.350
Kori Afarak.	100			5.000
Kori Agandaouine.	150			2.700
Kori El Meki.	165	485	7,5	940 (1958)
Kori Tamgak.	560		3,3 (1)	
Kori Teloua.	1.170	350	23	437 (1958)
Kori Iferouane.	1.500		1,5 (1)	

(1) Bassins septentrionaux peu arrosés. Précipitations moyennes annuelles 50 mm (?).

Bassin	Superficie (en km ²)	Précipitation annuelle (en mm)	Coefficient d'écoulement (en %)	Volume écoulé (en milliers de m ³)
Teloua.	1.350	168	20	46.000
Tizzigour.	400	210	20	16.800
Tidinn.	1.000	210	20	42.000
Tamessalak.	1.000	178	5	8.900
Arenat-Guissat.	800	147	5	5.900
Anou-Makaren.	3.150	110	2	6.900
Talak.	8.500	63	1	5.400
Iferouane.	7.200	62	0,5	2.250
Torouf-Abardak.	2.200	117	1	2.600
Tarouadji et Ouest.	1.700	140	5	11.900
				148.650

contact du massif, à partir des ruissellements qui prennent naissance dans le massif.

Il est difficile d'établir le bilan hydrologique de la campagne 1959 pour ce massif. Le grand nombre de koris qui drainent le massif et la diversité tant de la pluviométrie que des conditions d'écoulement dans cette vaste zone de 27.000 km² ont rendu la tâche particulièrement difficile aux deux hydrologues. De plus, les écoulements se sont produits durant une période très courte qui s'est étendue du 1^{er} au 31 août.

Pour l'année 1959, le volume écoulé dans le Kori Teloua à la station de Razelmamoulmi, c'est-à-dire à 30 km en amont d'Agadès, a été évalué à 46 millions de m³; on peut admettre que le volume d'eau, à la sortie du massif, a été sensiblement le même qu'à Razelmamoulmi.

Pour les autres bassins de l'Air, les volumes écoulés seront calculés à partir des observations qualitatives et quantitatives que nous avons effectuées. Il est évident que ces résultats sont loin d'être précis, on pense néanmoins donner des valeurs acceptables, eu égard à la précision recherchée.

L'écoulement global qui a contribué à l'alimentation des nappes aquifères de la zone sédimentaire à l'Ouest de l'Air peut donc être estimé à 150 millions de m³ d'eau environ.

Quelle est la part de cette masse d'eau qui s'est infiltrée? Il est impossible de le dire, étant donné que la majeure partie reste étalée en couche très mince ou vient imbiber les couches superficielles du sol; il est certain que la majeure partie est perdue par évaporation.

Dans quelle proportion varient ces apports? En année très abondante, il n'est pas exagéré de prétendre que 500.000.000 m³ sortent du massif.

Pour une année sèche, il est impossible d'avancer un chiffre. Il ressort de cette étude :

1° que le versant occidental de l'Air présente un fort coefficient de ruissellement donnant lieu à des crues dangereuses, mais susceptibles d'alimenter les nappes de façon importante et de permettre

dans l'intérieur du massif des aménagements hydrauliques tels que barrages souterrains, grands barrages à sable, sous réserve bien entendu de la possibilité d'utilisation de l'eau ainsi mise en réserve pour une production agricole rentable;

2° que la part des apports infiltrés dans le grès reste inconnue; elle ne pourrait être déterminée que par des études conjointes des hydrogéologues et des hydrologues;

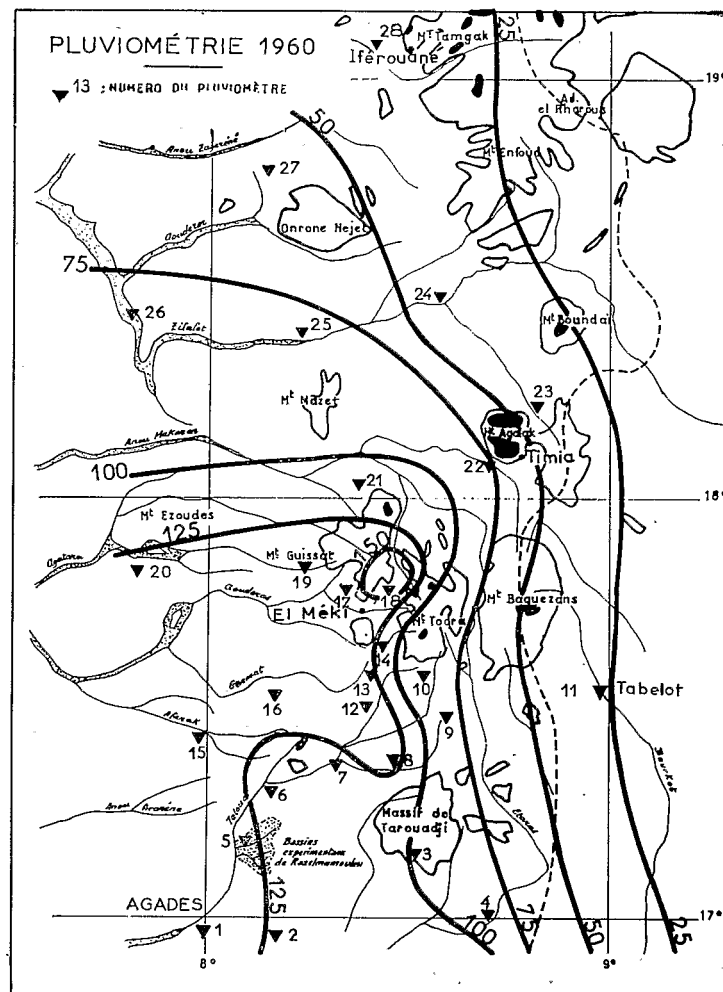
3° qu'une seconde campagne d'étude serait particulièrement utile pour donner une base plus sûre aux données de ce premier rapport et pour tenter d'obtenir des chiffres relatifs à une année sèche.

L'Air, comme on vient de le voir, est une des régions du Sahara présentant les meilleures conditions d'écoulement; il serait dommage de ne pas chercher à obtenir une meilleure connaissance de ces importantes ressources et de leurs possibilités pratiques d'utilisation.

Campagne 1960

Le programme de la campagne 1960, effectuée également par l'O.R.S.T.O.M., et ayant fait l'objet de deux conventions passées d'une part avec l'O.C.R.S. et d'autre part avec le Ministère des Travaux publics du Niger, est sensiblement le même que celui de la campagne 1959 : études de la pluviométrie sur le versant occidental du massif, du ruissellement sur des bassins expérimentaux de faible superficie, du ruissellement du Kouri Teloua, étude extensive des koris de l'Air, études annexes d'évaporation d'une nappe d'inféoflux, des variations du niveau des nappes, des mesures d'inféoflux. L'exécution de ce programme a été également confiée à M. LEFÈVRE, assisté de M. SABATIER, agent technique hydrologue.

Le réseau météorologique a été complété par l'installation de 4 pluviographes journaliers, d'un pluviographe hebdomadaire, de 2 pluviomètres « Association » et de 24 pluviomètres totalisateurs. Les isohyètes de l'année ont donc pu être tracés avec davantage de précision.



1960 a paru légèrement déficitaire sur la quasi-totalité du massif. La pluviométrie moyenne a été inférieure à celle de 1959, et en dessous de celle d'une année normale.

Comparativement à 1959, où les précipitations, par suite de la montée tardive du F.I.T., furent concentrées au mois d'août, les averses ont été, en 1960, également réparties entre juillet, août et septembre; cette différence dans la répartition mensuelle des précipitations est à l'origine de la forte dissemblance entre les écoulements observés durant la campagne de 1959 et celle de 1960.

L'étude détaillée des bassins versants expérimentaux, dont l'équipement a été poursuivi, celle du Kori Teloua, les études extensives sur les autres koris, ont en effet donné des chiffres assez sensiblement différents de ceux avancés en 1959.

Rappelons quelques-uns des résultats obtenus au cours de ces deux campagnes :

PLUVIOMÉTRIE :

a) Station d'Agadès

en année moyenne	167 mm
en 1959	238 mm
en 1960	147 mm
Répartition mensuelle (pourcentage d'août) :	
en année moyenne	56 %
en 1959	67 %
en 1960	37 %

b) Pluviométrie moyenne du bassin du Teloua :	
en 1959	168 mm
en 1960	116 mm

HYDROLOGIE :

a) Teloua à Razelmamoulmi ($S = 1.170 \text{ km}^2$) :

Volume écoulé en 1959	46.000.000 m ³
» » en 1960	14.000.000 m ³
Coefficient d'écoulement en 1959	23 %
» » en 1960	10 %
b) Bassin versant d'In Tiziouen ($S = 1,81 \text{ km}^2$) :	
Coefficient d'écoulement en 1959	27 %
» » en 1960	17 %

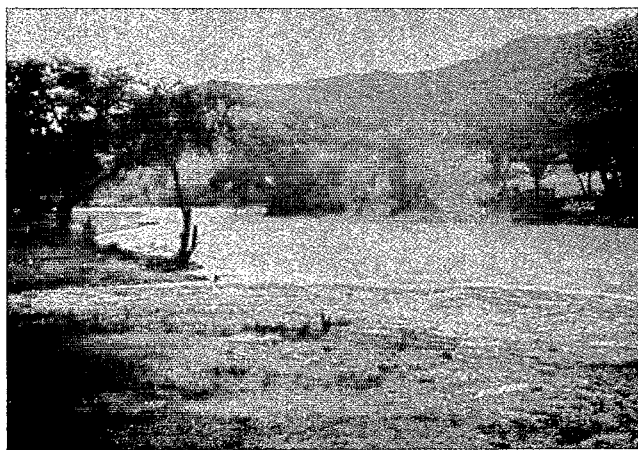
En 1959, on avait estimé que le volume écoulé dans le kori Teloua à la station de Razelmamoulmi était sensiblement le même qu'à la sortie du massif. La campagne 1960 a permis de préciser cette question; les coefficients d'écoulement suivants ont été établis :

Station de Razelmamoulmi (km 86). $K_e = 10 \%$
 Station d'Azal (km 101) sensiblement
 à la sortie du massif $K_e = 6 \%$

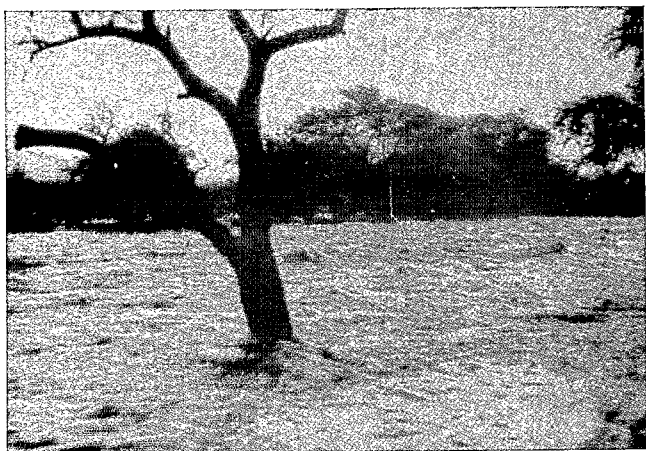
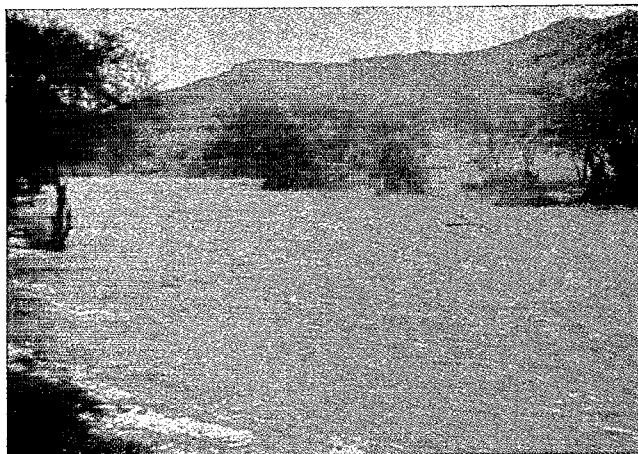
Bien que les caractéristiques pluviométriques aient été différentes en 1959 et 1960, on peut estimer que la valeur admise pour le volume écoulé à la sortie du massif en 1959 est légèrement trop forte (environ 10 %).

Les observations effectuées sur les principaux koris de l'Air ont montré que seuls les koris situés

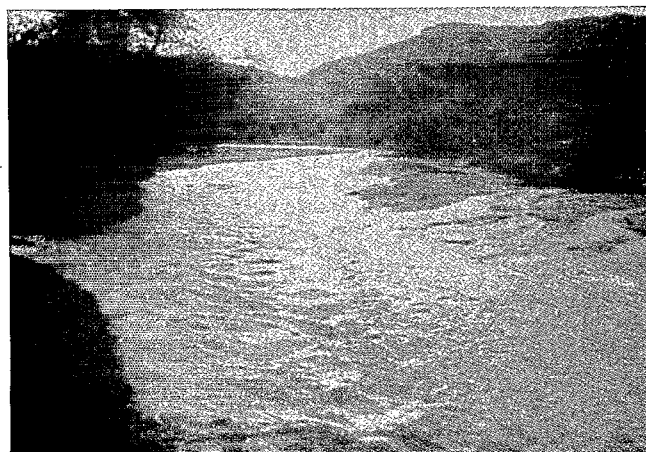
Kori in Tiziouen. Début de la crue.



Kori in Tiziouen. Maximum de la crue.



Kori in Tiziouen. A la décrue.



dans le quadrilatère Agadès-Massif de Guissat-Monts Todra-Massif de Taroudji ont contribué, en 1960, par leurs écoulements, à l'alimentation des nappes aquifères situées à l'Ouest du massif de l'Aïr.

En effet, en dehors de ce quadrilatère, le réseau hydrographique est trop dégradé et la pluviométrie trop faible pour qu'il y ait un écoulement non négligeable à la sortie du massif, en dehors des années à très forte pluviométrie.

L'écoulement global a été probablement surestimé en 1959, et il serait plus vraisemblable de l'évaluer à 110.000.000 m³ d'eau environ dont 100.000.000 m³ pour les koris du quadrilatère défini ci-dessus.

En 1960, les écoulements, négligeables en dehors de ce quadrilatère, se limitent à un ensemble de bassins dont la superficie totale est de 4.550 km², avec une hauteur d'eau moyenne annuelle de 120 mm et un coefficient d'écoulement de 6 %, le volume écoulé global peut être estimé à 33.000.000 m³ d'eau.

Bien que l'année 1960 ne puisse être considérée comme très sèche, les apports ont été trois fois moindres qu'en 1959, année légèrement exécutaire. Ces chiffres mettent en valeur la décroissance rapide du volume écoulé en fonction de la pluviométrie et autorisent l'hypothèse qu'en année sèche (pluviométrie moyenne inférieure à 100 mm), les apports, à la nappe des grès d'Agadès, sont pratiquement nuls.

Quelle est la part de cette masse d'eau qui, en 1960, a alimenté les nappes aquifères? Il est difficile de l'évaluer quantitativement.

Enfin, en annexe, on a poursuivi les études sur l'évaporation d'une nappe d'inféro-flux, ébauchées en 1959, et qui permettraient de penser que l'évaporation d'une nappe située à 0,30 m de profondeur est pratiquement négligeable, celles de la vitesse d'écoulement des inféro-flux — le chiffre avancé en 1959 était un peu trop élevé. De même a été envisagée la possibilité de la création de barrages d'inféro-flux dans les principaux koris, qui permettraient le stockage des eaux et réduirait les risques d'inondation, pour la ville d'Agadès en particulier.

Les résultats de ces trois études montrent tout l'intérêt de campagne de prospection hydrologique menées avec rigueur, méthode et courage dans des régions d'abord difficile, et qui paraissent particulièrement deshéritées. On voit combien seraient grandes cependant les possibilités de mise en valeur et d'amélioration du niveau de vie par l'utilisation des eaux, superficielles ou souterraines, qui y existent en quantités non négligeables et sont susceptibles de renouvellement.

TERRES ET EAUX

Revue Internationale
de l'Hydraulique et
de l'Équipement rural

14^e
ANNÉE

n° 38

1^{er} et 2^e TRIMESTRES 1962

FONDATEUR :

GEORGES DROUHIN, Ingénieur-Conseil; Président
de l'Association Française pour l'Étude des
Irrigations et du Drainage, Membre du Collège
d'Experts de l'UNESCO pour la zone aride.

CONSEILLER SCIENTIFIQUE :

MARGUERITE RICHARD, Docteur ès sciences

DIRECTEUR RESPONSABLE : ÉLISE NOUËL

ÉDITIONS "TERRES & EAUX"

117, RUE DES POISSONNIERS, PARIS (18^e)
TÉLÉPHONE : MON 56-30

Prix du numéro... 11 NF

ABONNEMENTS (4 NUMÉROS)

France. 38 NF

Etranger. 50 NF

RÉGISSEUR PUBLICITAIRE : HÉRAL PUBLICITÉ
23, rue Tronchet, PARIS (8^e) - Tél. : ANJ. 15-26

C.C.P. PARIS 1109-605

Sommaire

SPÉCIAL AFRIQUE NOIRE

LA POLITIQUE DE L'EAU EN AFRIQUE NOIRE..... 2
par Pierre Merlin, Ingénieur en chef des Ponts-et-
Chaussées.

EN MANIÈRE DE BREF HISTORIQUE..... 6
par Jean Archambault.

LA VALLÉE DU SÉNÉGAL..... 8
par M. I. Chéret, Ingénieur des Ponts-et-Chaussées.

NOUVELLES MÉTHODES DE RECHERCHE HYDROLO-
GIQUE DANS LES RÉGIONS ARIDES..... 40
par J. Rodier, Ingénieur en chef à Electricité de France.

ÉTUDES D'HYDROLOGIE SUPERFICIELLE EN RÉGIONS
SUBDÉSERTIQUES ET DÉSERTIQUES D'AFRIQUE
NOIRE..... 46
par la Section Hydrologique de l'Office de la Recherche
et Technique d'Outre-Mer.

"TERRES ET EAUX" à travers le monde..... 74

O. R. S. T. O. M.

20 DEC. 1968

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 32751 - 32752

Cote : B

La reproduction ou traduction des articles publiés dans TERRES ET EAUX n'est
autorisée qu'avec l'accord de la Direction de la Revue.