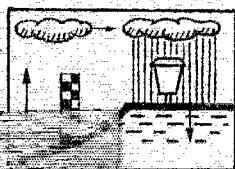


REPUBLIQUE DU NIGER

**Note hydrologique sur le GOULBI de MARADI
et le lac de MADAROUNFA**



D8
CHA

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

BUREAU CENTRAL HYDROLOGIQUE - PARIS



10964

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

Service Hydrologique

NOTE HYDROLOGIQUE SUR LE GOULBI DE MARADI
ET LE LAC DE MADAROUNFA
(NICER)

par

P. CHAPERON

Maître de Recherches à l'ORSTOM

20 JAN. 1972



PARIS, Décembre 1971

10964

D8
CHA

.....

"La loi du 11 Mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de
"l'article 41, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement
"réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation
"collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations
"dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou repro-
"duction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou
"de ses ayants-droit ou ayants-cause, est illicite" (alinéa 1er de l'article
"40).

"Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit,
"constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et
"suivants du Code Pénal".

.....

S O M M A I R E

	Pages
1. CADRE GEOGRAPHIQUE	1
2. OBSERVATIONS et MESURES	2
2.1. Climatologie	2
2.2. Hydrologie	3
3. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES	7
3.1 Le GOULBI de MARADI	7
3.2 Le GOULBI de GABI	10
3.3 Le lac de MADAROUNFA	12
4. CONCLUSIONS	24

L'objet de cette note est :

- de dresser le bilan des observations et mesures effectuées sur le GOULBI de MARADI et le Lac de MADAROUNFA, de 1956 à 1959 par la Subdivision d'Etudes des Vallées Sèches (Travaux Publics), puis à partir de 1961 par le Service Hydrologique de l'ORSTOM pour le compte du Service du Génie Rural de la République du NIGER;
- de présenter les résultats d'une analyse sommaire des principales caractéristiques hydrologiques du GOULBI de MARADI et du Lac de MADAROUNFA;
- de faire un état des observations et mesures complémentaires qui pourraient être effectuées au cours d'une ou deux campagnes afin de préciser certains points de l'analyse des régimes des cours d'eau étudiés, en vue d'établir les éléments hydrologiques du projet d'aménagement hydro-agricole du Lac de MADAROUNFA.

1. CADRE GEOGRAPHIQUE

Le GOULBI de MARADI prend sa source au NIGERIA, à une centaine de kilomètres au Nord-Ouest de KANO. Son bassin supérieur, situé tout entier au NIGERIA, repose sur les roches éruptives et métamorphiques calco-alcalines de l'antécambrien. Le réseau hydrographique, de direction générale Sud-Est - Nord-Ouest, est assez dense et bien marqué; la pente est, à l'entrée du GOULBI en territoire nigérien, de 0,09 %. Après NIELLOUA, à la frontière NIGER-NIGERIA, le GOULBI quitte le socle cristallin et coule sur des terrains sédimentaires constitués de grès bariolés du Continental Hamadien, recouverts d'alluvions anciennes caillouteuses et d'alluvions modernes argilo-sableuses. Le réseau hydrographique, de direction Sud-Nord, devient alors plus lâche et se caractérise par un cours sinueux et une pente plus faible (0,05 % au niveau du pont de MADAROUNFA). La dégradation spécifique des cours d'eau sahéliens apparaît avec les méandres et les débordements. Le lit majeur du GOULBI, zone de débordements, boisée, large d'un kilomètre, se dirige ensuite, après MARADI, vers l'Ouest, puis, après un parcours d'environ 80 km en territoire nigérien, pénètre de nouveau au NIGERIA et rejoint la RIMA, affluent de la rivière SOKOTO, qui se jette dans le NIGER.

Le régime du GOULBI de MARADI, tel qu'on le connaît en territoire nigérien, se rattache au type tropical à tendance sahélienne bien marquée. Le bassin est encadré par les isohyètes 800 au Sud et 650 (MARADI) au Nord. L'écoulement a lieu de juin à octobre, d'abord intermittent (juin), puis continu (juillet à septembre).

La région étudiée dans cette note est située entre la frontière du NIGERIA, au Sud, et la ville de MARADI au Nord, soit entre les parallèles 13° et 13°30' Nord et les méridiens 7° et 7°20' Est (graphique 1).

Deux stations de contrôle ont été implantées sur le GOULBI : la première à NIELLOUA, à la frontière, la seconde à MADAROUNFA, à une vingtaine de kilomètres au Sud de MARADI. A MADAROUNFA, le bassin du GOULBI a une superficie de 5 400 km².

Le Lac de MADAROUNFA est situé sur la rive gauche du GOULBI de MARADI, à un kilomètre et demi du pont de MADAROUNFA (graphique 2). Les coordonnées du centre du Lac sont les suivantes :

longitude	7°09' E
latitude	13°19' N

Le lac s'est créé à l'ancien confluent du GOULBI de GABI et du GOULBI de MARADI. Ce sont les alluvions déposées par les débordements du GOULBI de MARADI qui, en élevant un bourrelet de rive, ont barré le cours du GOULBI de GABI, son ancien affluent.

Le GOULBI de GABI, dont les apports contribuent essentiellement à l'alimentation du lac, draine un bassin d'environ 700 km², aux limites assez mal définies, situé en bordure du GOULBI de MARADI.

Le GOULBI de MARADI est relié au lac de MADAROUNFA par un effluent (canal de MADAROUNFA). Le GOULBI alimente le lac par ce canal en début de saison des pluies ainsi que par de larges débordements au cours des plus fortes crues. En fin de saison des pluies, le canal joue le rôle de trop-plein pour le lac qui se déverse alors dans le GOULBI de MARADI.

2. OBSERVATIONS et MESURES

2.1 Climatologie

2.1.1 Pluviométrie

La station de référence est la station de MARADI (13°28' N - 07°05' E) située à une vingtaine de kilomètres au Nord du lac de MADAROUNFA.

Moyenne interannuelle

624 mm sur 38 ans (1932-1969)

Quantiles

: F dépassement	: 0,99	: 0,90	: 0,80	: 0,50	: 0,20	: 0,10	: 0,01	:
: Hauteur annuelle	: 383	: 481	: 528	: 625	: 705	: 794	: 952	:
: en mm	:	:	:	:	:	:	:	:

Moyennes mensuelles (en mm)

: J	: F	: M	: A	: M	: J	: J	: A	: S	: O	: N	: D	:
: 0	: 0	: 0	: 5	: 30	: 64	: 161	: 240	: 110	: 14	: 0	: 0	:

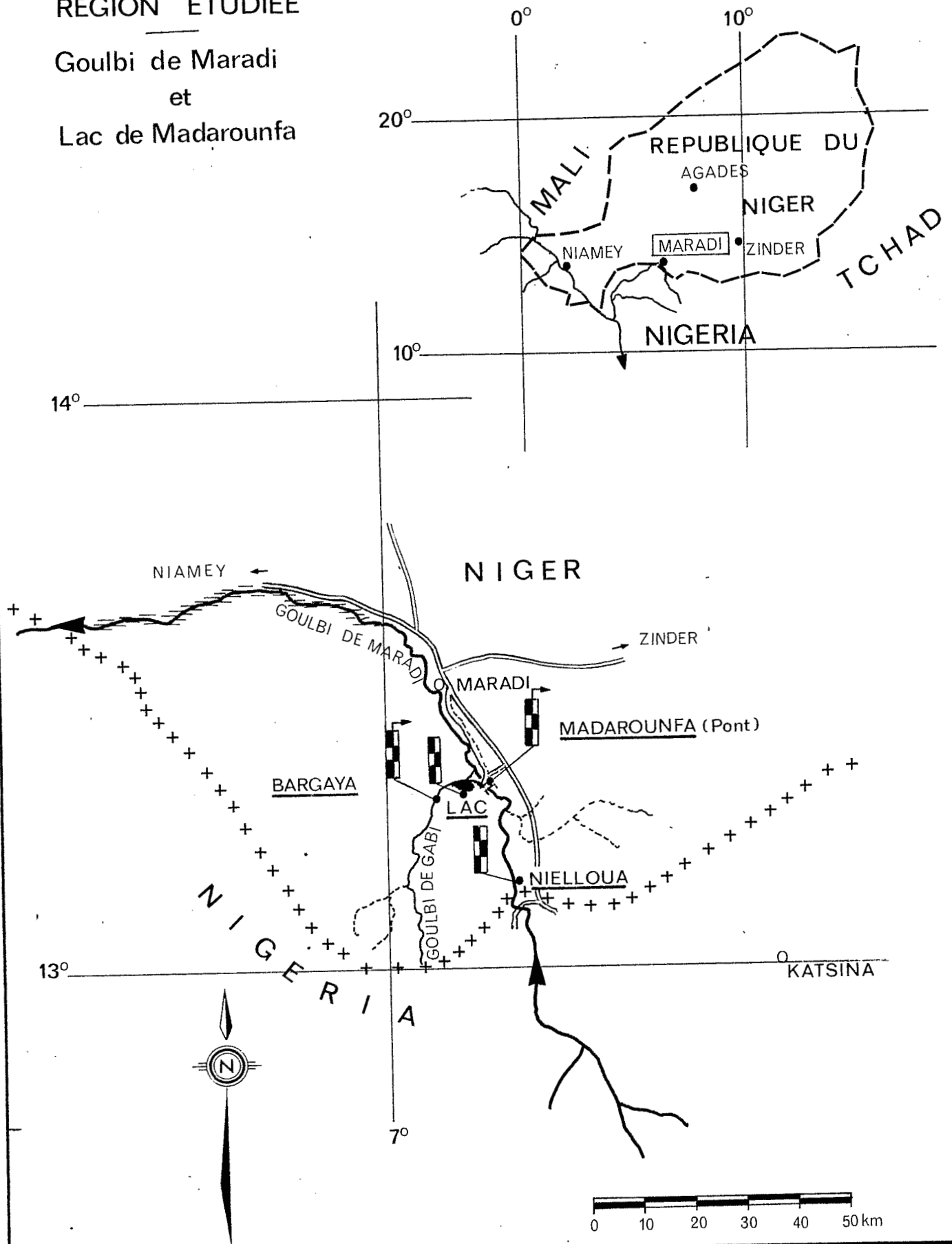
Hauteurs maximales journalières

: Récurrence	: 1 an	: 5 ans	: 10 ans	: 100 ans	:
: P (mm)	: 55,0	: 79,1	: 89,5	: 124,2	:

CARTE GEOGRAPHIQUE

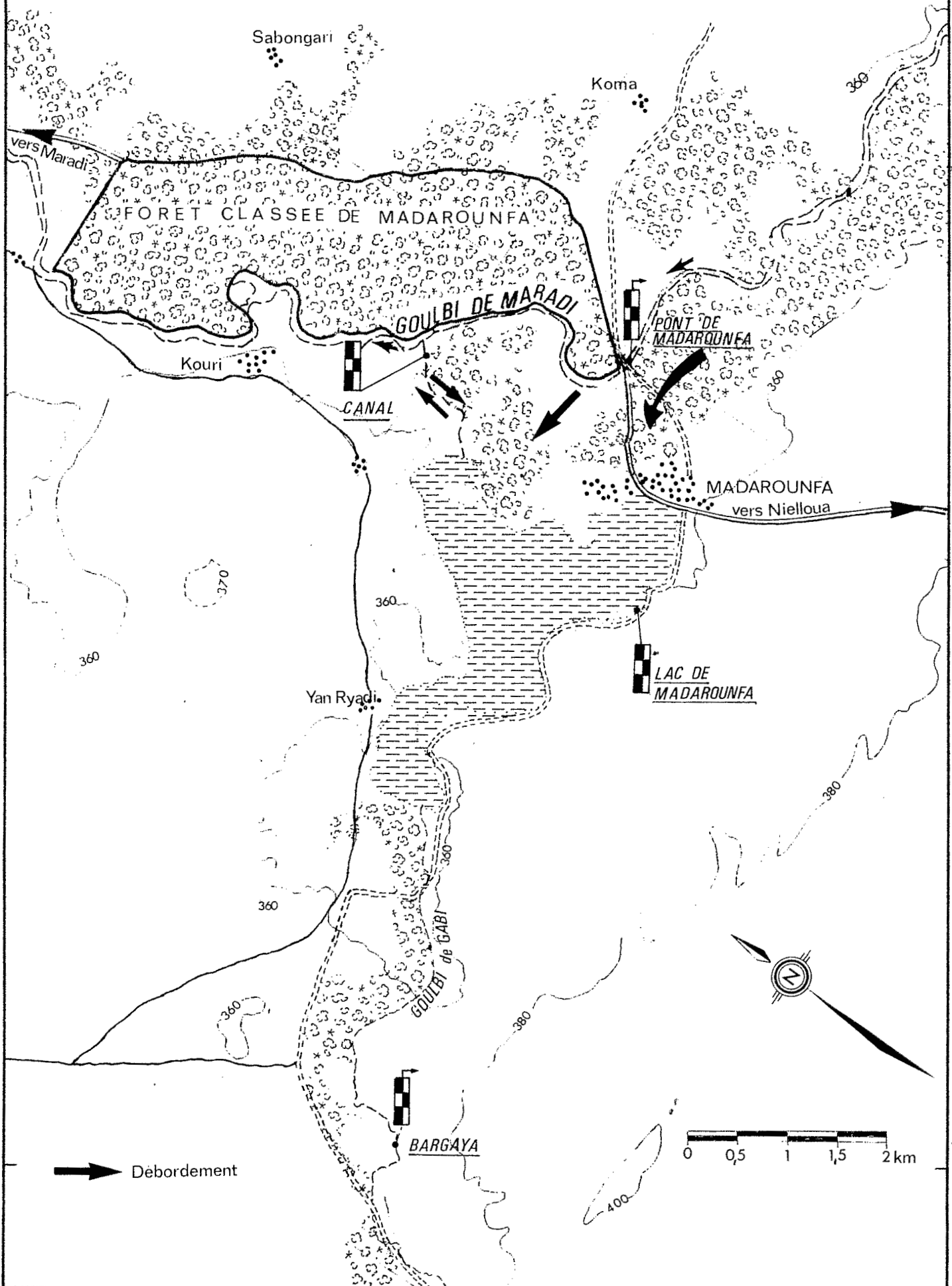
DE LA REGION ETUDIEE

Goulbi de Maradi et Lac de Madarounfa



Carte du lac de MADAROUNFA et des environs

Gr - 2



O.R.S.T.O.M. Service Hydrologique

date	des.
12-71	D-JP

NIG - 72.03.0

2.1.2 Evaporation

Nous disposons des résultats des mesures effectuées sur évaporomètre PICHE à la station climatologique de MARADI. Les moyennes journalières sont les suivantes (1953-1960) en mm :

: J	: F	: M	: A	: M	: J	: J	: A	: S	: O	: N	: D	:
: 10,3	: 12,1	: 12,7	: 12,1	: 10,1	: 7,0	: 4,1	: 2,4	: 3,1	: 6,3	: 9,7	: 9,4	:

Le total moyen annuel est de 3 010 mm.

Beaucoup plus intéressantes sont les observations effectuées à la station IRAT de TARNA (située à proximité du pont de MADARAFOUNFA) sur un bac COLORADO enterré. Les moyennes journalières sont les suivantes (1965-1970) en mm :

: J	: F	: M	: A	: M	: J	: J	: A	: S	: O	: N	: D	:
: 7,9	: 9,2	: 10,1	: 9,5	: 9,3	: 8,2	: 6,1	: 4,4	: 4,6	: 6,7	: 7,9	: 7,1	:

Le total moyen annuel est de 2 763 mm.

2.2 Hydrologie

Les stations, situées dans la région étudiée et dont la période d'observations est suffisamment longue, sont les suivantes (cf. graphiques 1 et 2) :

NIELLOUA	(GOULBI de MARADI)	7°13' E	13°09' N
MADAROUNFA	(GOULBI de MARADI)	7°10' E	13°19' N
BARGAYA	(GOULBI de GABI)	7°05' E	13°17' N
MADAROUNFA	(LAC de MADAROUNFA)	7°09' E	13°18' N

2.2.1 NIELLOUA

La station est située dans une petite gorge, à proximité immédiate de la frontière. Le bassin versant contrôlé a une superficie de 4 800 km². L'altitude de la station est de 378 m environ.

L'échelle limnimétrique a été installée en 1957 par la Subdivision d'Etudes des Vallées Sèches. Cette échelle, située à proximité de l'ancien campement de NIELLOUA, est constituée :

- d'un élément (0 - 1 m) en rive droite, dont la cote du zéro est 378,29 m;
- d'une échelle (0 - 6 m) composée de cinq éléments étagés sur la rive gauche. Le zéro de cette échelle est calé à 39 cm au-dessus du zéro de l'élément rive droite (378,68 m).

Les lectures sont faites sur les deux échelles. Les relevés de hauteurs ainsi que la courbe de tarage sont ramenés à l'échelle de la rive droite.

Les relevés de hauteurs ont été effectués et publiés dans les ouvrages suivants :

- 1957 et 1958 : "Etudes Hydrologiques sur le NIGER MOYEN et ses affluents - Rapport complet des observations et mesures de débit effectuées avant 1961" - ORSTOM 1961
- août 1959 : "Bilan sommaire des études d'hydrologie de surface effectuées sur le territoire de la République du NIGER" ORSTOM 1964
- 1961 à 1965 : "Observations et mesures hydrologiques dans les Vallées Sèches - Rapport des campagnes 1961 à 1965" - ORSTOM 1961 à 1965
- 1966 à 1970 : "Annaires Hydrologiques du NIGER 1966 à 1970" ORSTOM

Vingt-sept mesures de débit ont été effectuées de 1957 à 1970, de $0,40 \text{ m}^3/\text{s}$ à $193 \text{ m}^3/\text{s}$ (cf. liste des mesures dans les Annaires Hydrologiques 1968, 1969 et 1970). Au-dessus de la cote $H = 2,50 \text{ m}$, les mesures classiques au moulinet sont pratiquement impossibles à effectuer sans téléphérique en raison de la vitesse du courant. Les méthodes de jaugeage chimique avec reconcentration devront être employées.

La courbe de tarage (graphique 3) est basée sur les jaugeages effectués et sur des points calculés à partir de $H = 3,00 \text{ m}$. L'extrapolation est effectuée à partir d'un ajustement analytique :

$$Q \text{ m}^3/\text{s} = 28,3 (H^{11} + 0,10)^{1,78}$$

Les traductions de hauteurs en débits ont été effectuées et les débits moyens journaliers publiés pour les années 1965 à 1970 dans les Annaires Hydrologiques 1966 à 1970.

Les années antérieures seront traduites dès que la courbe de tarage sera précisée pour les hautes eaux.

2.2.2 MADAROUNFA (Pont)

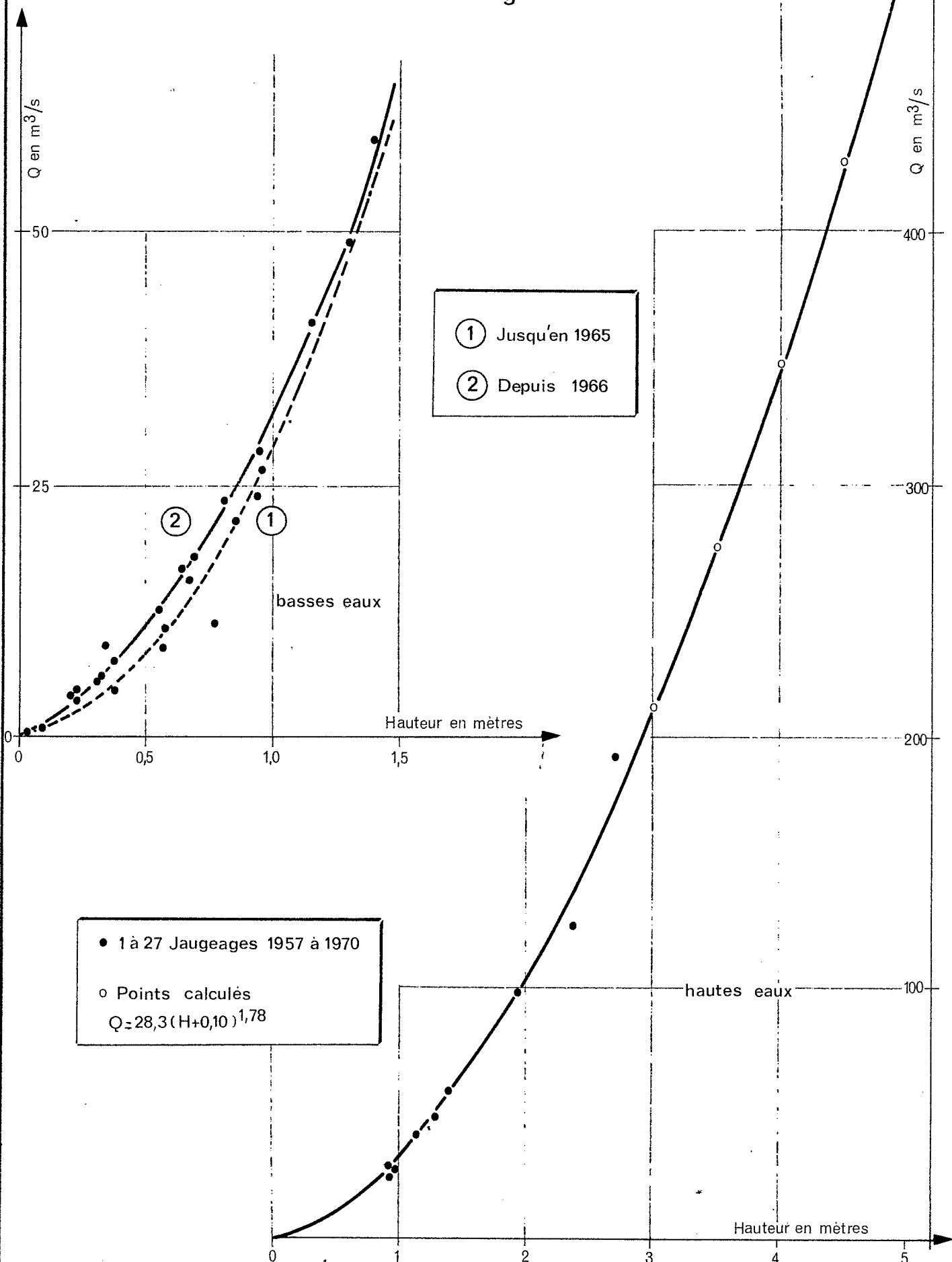
La station est située sur le GOULBI de MARADI, à l'emplacement du pont routier qui relie le village de MADAROUNFA, sur le lac, à la ville de MARADI, à une vingtaine de kilomètres au Nord du lac. Le bassin versant contrôlé a une superficie de $5\,400 \text{ km}^2$. L'altitude de la station est de 355 m environ.

La première échelle a été installée en mai 1956, sur une pile du pont de MADAROUNFA, par la Subdivision d'Etudes des Vallées Sèches (Travaux Publics). La cote du zéro de cette échelle est $355,20 \text{ m}$. En 1961, l'échelle a été réinstallée à quelques mètres en amont du pont (même zéro). Elle était constituée de trois éléments (0 à 2 m dans le lit mineur, 2 à 3 m sur la berge pour le contrôle des débordements).

GOULBI DE MARADI A NIELLOUA

Gr - 3

Courbe de tarage



Les relevés de hauteurs ont été effectués à cette échelle et publiés dans les ouvrages suivants :

- 1956 : "Bilan sommaire Etudes d'Hydrologie au NIGER" - ORSTOM 1964
- 1957 et 1958 : "Etudes hydrologiques sur le NIGER MOYEN et ses affluents - Rapport des observations effectuées avant 1961" - ORSTOM 1961
- 1961 à 1964 : "Observations dans les Vallées Sèches - Rapports 1961 à 1964" - ORSTOM

De 1957 à 1964, soixante-sept mesures de débit (cf. Rapport Vallées Sèches 1961 à 1964) ont été effectuées.

Deux courbes de tarage ont été établies (graphique 4). La première (jaugeages n° 1 à 56) est applicable à la traduction des hauteurs en débits pour les années 1956 à 1963. La seconde (jaugeages n° 57 à 67) correspond à un creusement du lit mineur et s'applique à l'année 1964.

On note pour les hauteurs supérieures à 2 m, un redressement très sensible de la courbe qui correspond aux débordements en nappe sur les deux rives. Des mesures de débordements effectuées en 1961 et 1964 ont permis de tracer les courbes jusqu'à 2,40 m. Le débit correspondant à la plus forte cote observée (2,56 m) a été estimé à 450 m³/s.

Les débits moyens journaliers ont été publiés dans les ouvrages cités ci-dessus.

La seconde échelle a été installée en 1965, après l'allongement du pont et l'agrandissement de son débouché (une travée supplémentaire). Cette échelle (3 m) est doublée d'un limnigraphe enregistreur OTT X. L'échelle a été calée au même zéro.

Les relevés de hauteurs à cette échelle ont été publiés dans les ouvrages suivants :

- 1965 : "Observations dans les Vallées Sèches - Rapport Campagne 1965" - ORSTOM
- 1966 à 1968 : "Complément à l'Annuaire Hydrologique du NIGER 1968" - ORSTOM
- 1969 et 1970 : "Annales Hydrologiques du NIGER 1969 et 1970" - ORSTOM

Vingt-sept nouvelles mesures de débit ont été effectuées de 1965 à 1970 (cf. Annales 1968, 1969 et 1970).

Une première courbe de tarage (graphique 5) avait été établie à partir des vingt-quatre premières mesures. Le tracé de la courbe pour $H > 2$ m a été basé sur les mesures de débordement faites en 1964. En 1970, des mesures effectuées à $H = 1,85$ m et $H = 1,95$ m ont mis en évidence un détarage très net pour les hautes eaux dû probablement à des ruptures dans les bourrelets de rive du lit mineur en amont de MADAROUNFA. Ce point sera évidemment à préciser au cours des prochaines campagnes.

Les débits moyens journaliers ont été publiés dans les ouvrages cités ci-dessus.

2.2.3 BARGAYA (GOULBI de GABI)

Une première station a été installée en 1961 sur le GOULBI de GABI, à environ 3 km de la limite des plus basses eaux du lac. Cette station, trop proche du lac et soumise à son influence, a été abandonnée en fin 1961, en raison des difficultés d'étalonnage de l'échelle.

La station actuelle, installée en 1962, est située à proximité du village de BARGAYA, hors de l'influence du lac. L'échelle, constituée de trois éléments de 1 mètre, est doublée d'un limnigraphe OTT X. Le zéro de l'échelle est calé à 357,46 m.

Les relevés de hauteurs effectués depuis 1962 ont été publiés dans les ouvrages suivants :

1962 à 1965 : "Observations dans les Vallées Sèches - Rapports 1962 à 1965" ORSTOM

1966 à 1968 : "Complément Annuaire Hydrologique du NIGER 1968" ORSTOM

1969 et 1970 : "Annales Hydrologiques NIGER 1969 et 1970"

Le tarage de l'échelle (graphique 6), basé sur les trente-quatre mesures de débits effectuées de 1962 à 1970 (cf. Annales Hydrologiques 1968 à 1970), couvre pratiquement le marnage observé.

Les débits moyens journaliers ont été publiés dans les ouvrages cités ci-dessus.

2.2.4 Lac de MADAROUNFA

L'échelle de contrôle des variations de niveau du lac a été installée en 1956 sur la rive Sud du lac par la Subdivision d'Etudes des Vallées Sèches. L'altitude de son zéro est 352,60 m.

Les relevés de hauteurs ont été publiés dans les ouvrages suivants :

1956 : "Bilan sommaire Etudes d'Hydrologie au NIGER" ORSTOM 1964

1957 - 1958 : "Observations effectuées au NIGER avant 1961" ORSTOM 1961

1961 à 1965 : "Observations Vallées Sèches - Rapports 1961 à 1965" ORSTOM

1966 à 1970 : "Annales Hydrologiques NIGER 1966 à 1970" ORSTOM

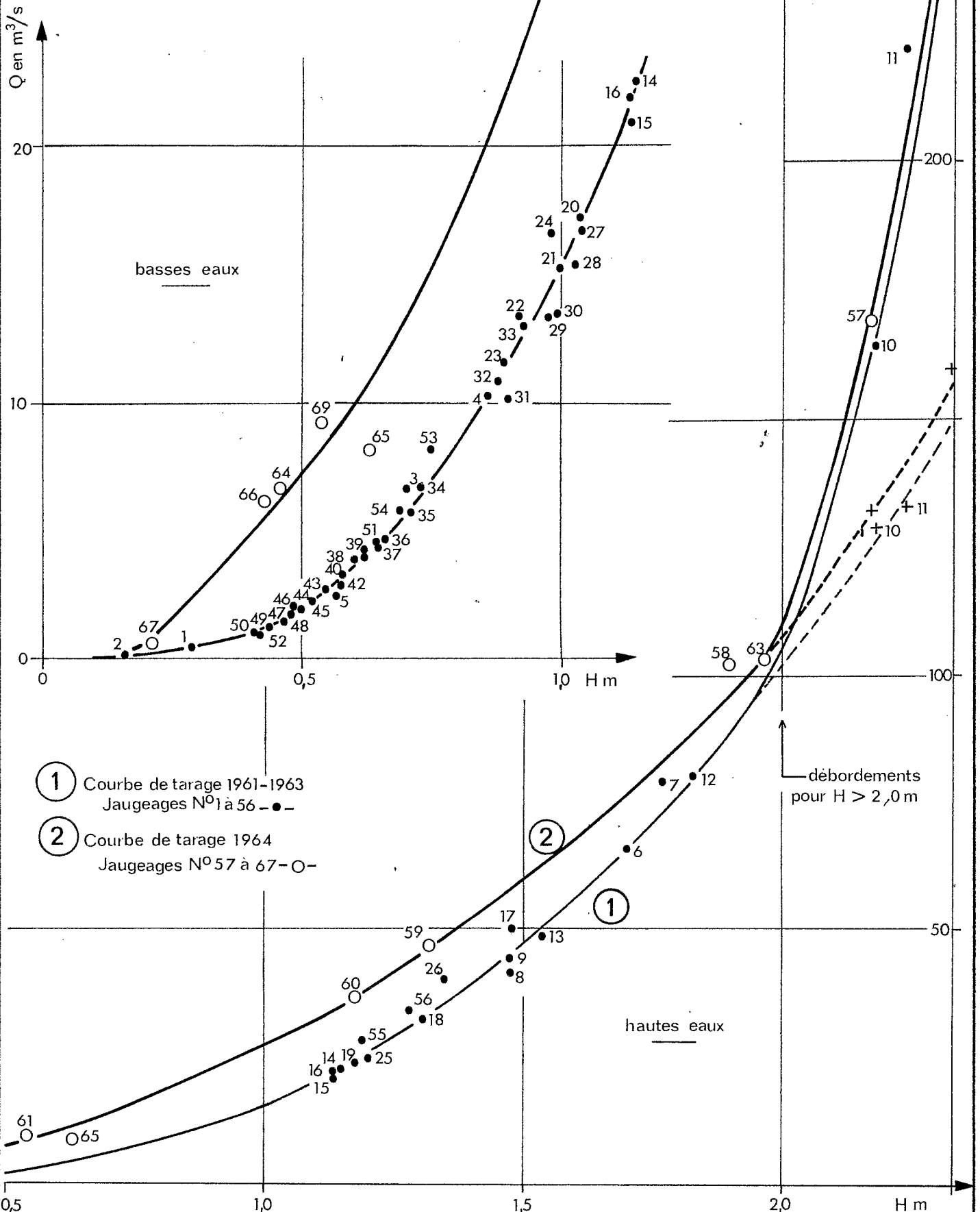
Il est possible, à partir des mesures topographiques effectuées par la SOGETIM en 1956 et la SOGETHA en 1962, de tracer, d'une façon approchée, les courbes de variations des surfaces et volumes du lac en fonction de la hauteur à l'échelle. Ces courbes (graphique 7) sont provisoires et devront être précisées par des levés topographiques de détail.

GOULBI DE MARADI A MADAROUNFA

Gr - 4

Courbes de tarage

1^{ere} échelle



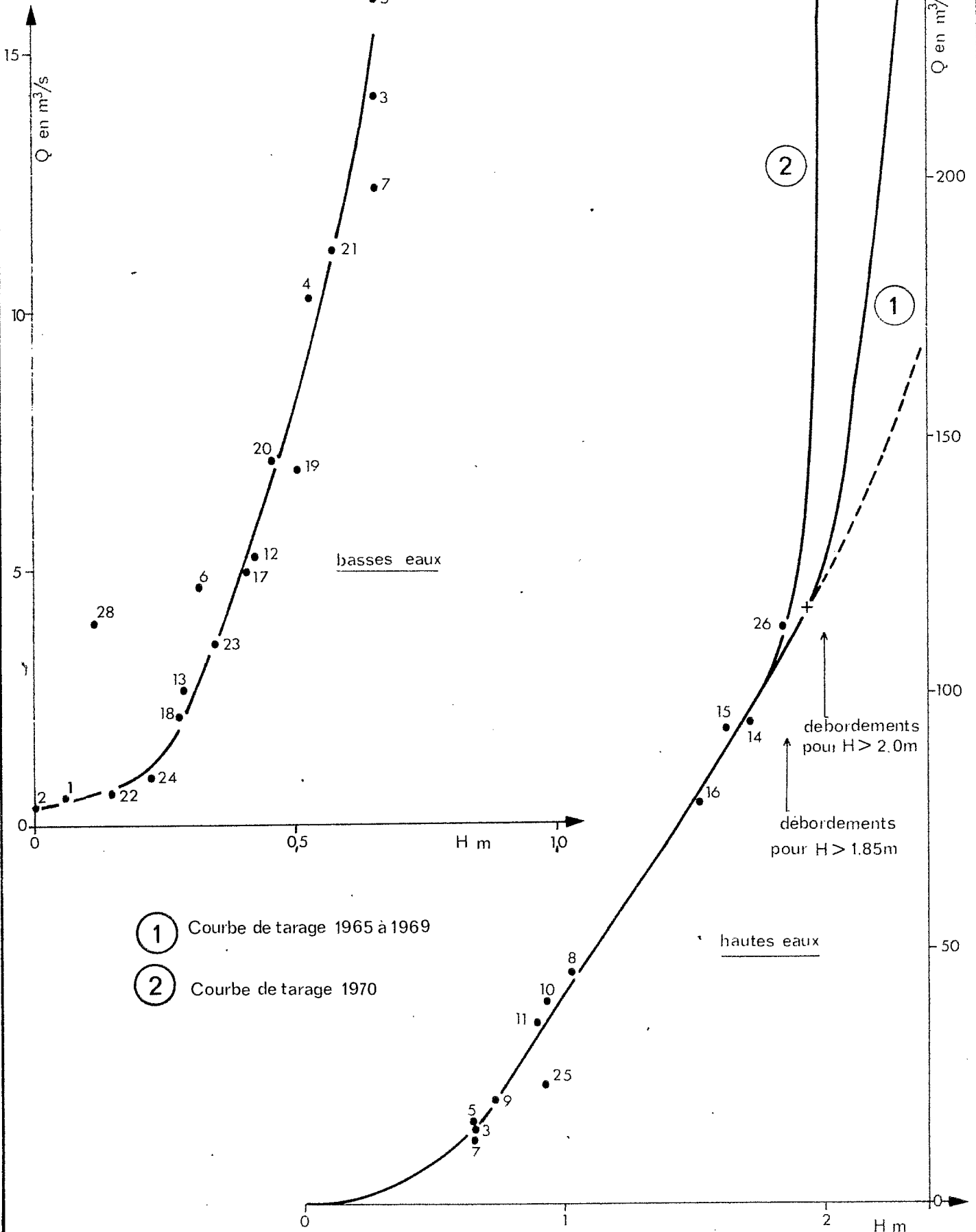
- ① Courbe de tarage 1961-1963
Jaugeages N°1 à 56 - ● -
- ② Courbe de tarage 1964
Jaugeages N°57 à 67 - ○ -

GOULBI DE GABI A MADAROUNFA

Gr - 5

Courbes de tarage

2^e echelle



① Courbe de tarage 1965 à 1969

② Courbe de tarage 1970

hautes eaux

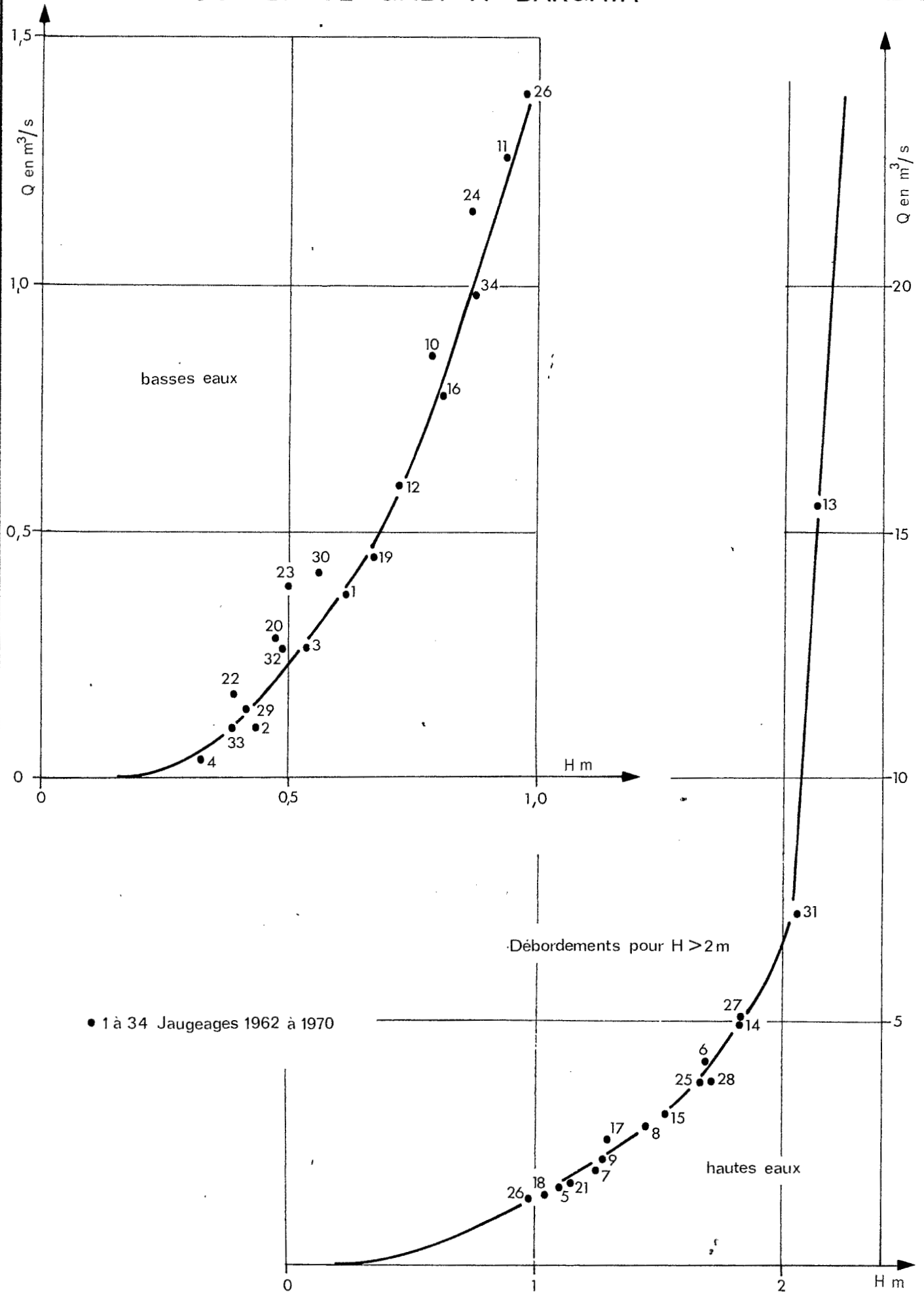
débordements pour H > 2.0m

débordements pour H > 1.85m

basses eaux

GOULBI DE GABI A BARGAYA

Gr_6



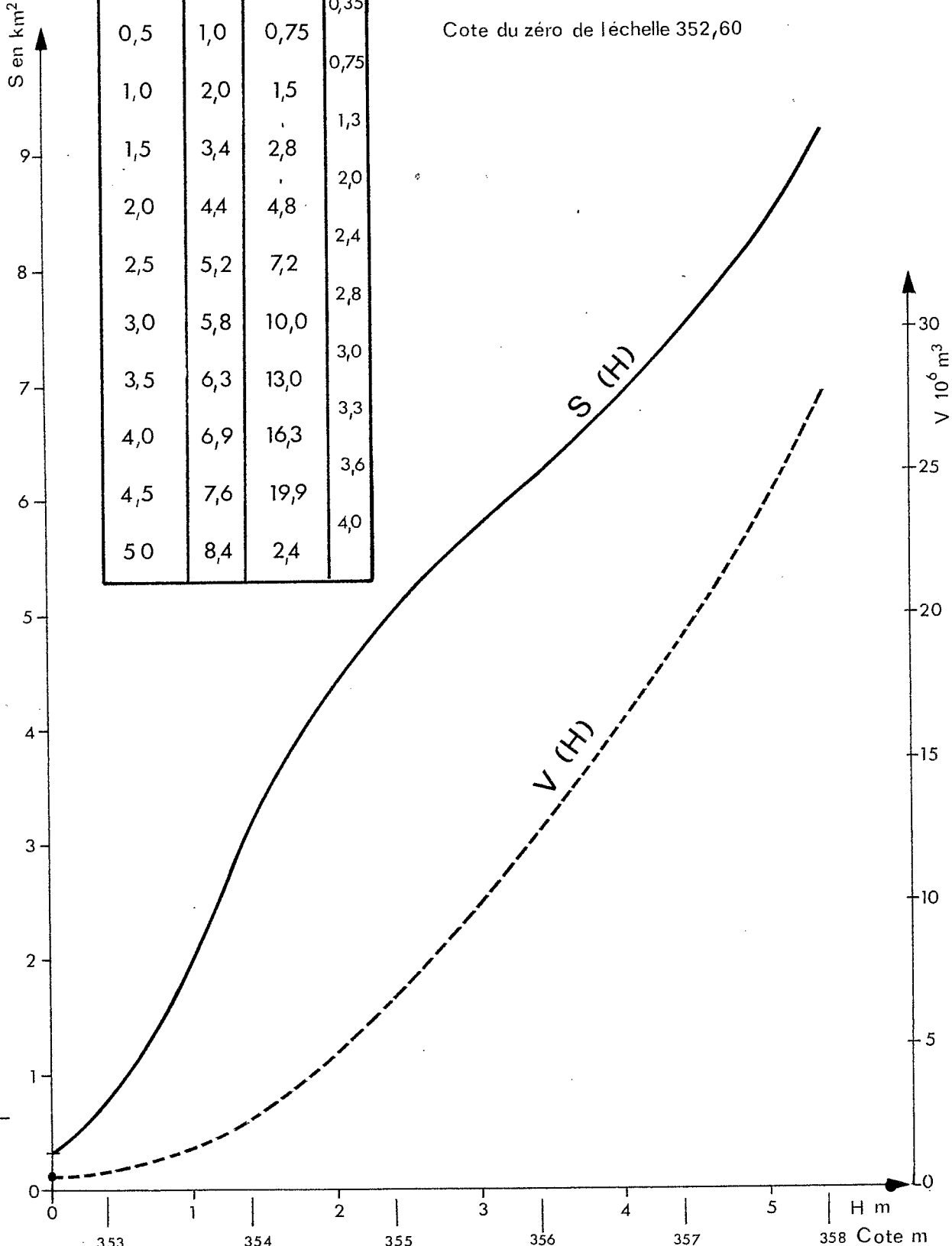
LAC DE MADAROUNFA

Courbes des superficies et des volumes

Hm	Skm ²	V10 ⁶ m ³	ΔV
0,0	0,3	0,4	0,35
0,5	1,0	0,75	0,75
1,0	2,0	1,5	1,3
1,5	3,4	2,8	2,0
2,0	4,4	4,8	2,4
2,5	5,2	7,2	2,8
3,0	5,8	10,0	3,0
3,5	6,3	13,0	3,3
4,0	6,9	16,3	3,6
4,5	7,6	19,9	4,0
5,0	8,4	2,4	

H hauteurs à l'échelle du lac

Cote du zéro de l'échelle 352,60



La superficie du lac varie entre 100 ha aux basses eaux (H = 0,50 m) et 600 à 700 ha en hautes eaux (H = 3,0 à 3,5 m).

Une échelle de contrôle a également été installée sur le canal qui relie le lac au GOULBI de MARADI. Les relevés qui ont été publiés depuis 1956 dans les ouvrages cités ci-dessus, indiquent la hauteur à l'échelle et le sens de l'écoulement (vers le lac ou vers le GOULBI).

3. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES

3.1 Le GOULBI de MARADI

3.1.1 MADAROUNFA (pont)

A cette station (qui est inscrite sur la liste des stations de la Décennie Hydrologique), treize années à peu près complètes sont connues (1956-1958 et 1961-1970).

Le tableau ci-dessous présente les débits moyens mensuels et les modules du GOULBI (en m³/s) :

: Année :	Mai :	Juin :	Juillet :	Août :	Septembre :	Octobre :	Novembre :	Module :
: 1956 :	- :	- :	17,4 :	45 :	24,4 :	0,13 :	0 :	(7,3) :
: 1957 :	0,61 :	0 :	3,47 :	21,8 :	12,1 :	1,80 :	0 :	3,34 :
: 1958 :	0 :	0 :	6,60 :	57,5 :	8,44 :	0,19 :	0 :	6,16 :
: 1959 :	- :	- :	- :	- :	- :	- :	- :	- :
: 1960 :	- :	- :	- :	- :	- :	16,7 :	- :	- :
: 1961 :	0 :	2,5 :	10,8 :	87 :	61 :	1,2 :	0,03 :	13,6 :
: 1962 :	0 :	0,8 :	11,1 :	11,6 :	15,1 :	0,34 :	0 :	3,3 :
: 1963 :	0 :	2,0 :	11,1 :	38,3 :	3,7 :	0,47 :	0 :	4,7 :
: 1964 :	0 :	1,32 :	20,0 :	55,6 :	42,9 :	0,40 :	0 :	10,0 :
: 1965 :	0 :	0 :	7,75 :	29,1 :	13,8 :	0,33 :	0 :	4,29 :
: 1966 :	0 :	0,13 :	7,16 :	12,9 :	28,6 :	1,62 :	0 :	4,20 :
: 1967 :	0 :	9,10 :	19,1 :	43,3 :	29,1 :	1,01 :	0 :	8,52 :
: 1968 :	0 :	1,92 :	14,7 :	10,1 :	2,33 :	0 :	0 :	2,45 :
: 1969 :	0 :	6,74 :	11,9 :	17,8 :	8,61 :	1,58 :	0 :	3,92 :
: 1970 :	0 :	0 :	34,2 :	60,8 :	33,6 :	0,16 :	0 :	10,8 :
: Moyenne :								
: interan-	0,05 :	1,89 :	13,3 :	37,8 :	21,4 :	0,71 :	0 :	6,34 :
: nuelle :								

Le module spécifique interannuel est de 1,15 l/s.km². La pluviométrie moyenne interannuelle (KANO, KATSINA, MARADI) peut être estimée à 700 mm, le coefficient d'écoulement interannuel est voisin de 5 %.

La station pluviométrique de MARADI n'est pas suffisamment représentative de la pluviométrie moyenne sur le bassin du GOULBI pour permettre une extension des données (modules) par régression hydropluviométrique. Une telle régression pourrait être établie si l'on disposait des relevés de KANO et KATSINA au NIGERIA.

Il est cependant possible d'ajuster graphiquement une loi exponentielle à la distribution naturelle des treize modules connus (cf. graphique 8).

Cet ajustement nous permet d'adopter les valeurs suivantes :

- Module en année médiane	:	5,4	m ³ /s	:
- Module en année décennale sèche	:	2,8	m ³ /s	:
- Module en année décennale humide	:	12,8	m ³ /s	:
- Module en année cinquantennale humide	:	20	m ³ /s	:

Les débits de crue maximaux relevés chaque année ont été les suivants :

1956	:	110	m ³ /s	::	1963	:	350	m ³ /s	:
1957	:	95	"	::	1964	:	254	"	:
1958	:	220	"	::	1965	:	104	"	:
1960	:	80	"	::	1966	:	105	"	:
1961	:	450	"	*	1967	:	200	"	:
1962	:	195	"	::	1968	:	117	"	:
	:			::	1969	:	158	"	:
	:			::	1970	:	413	"	:

* Le débit maximal de 1961 (H = 256 cm) a été estimé à 450 m³/s en extrapolant la courbe de tarage. Il a été certainement supérieur à 400 m³/s.

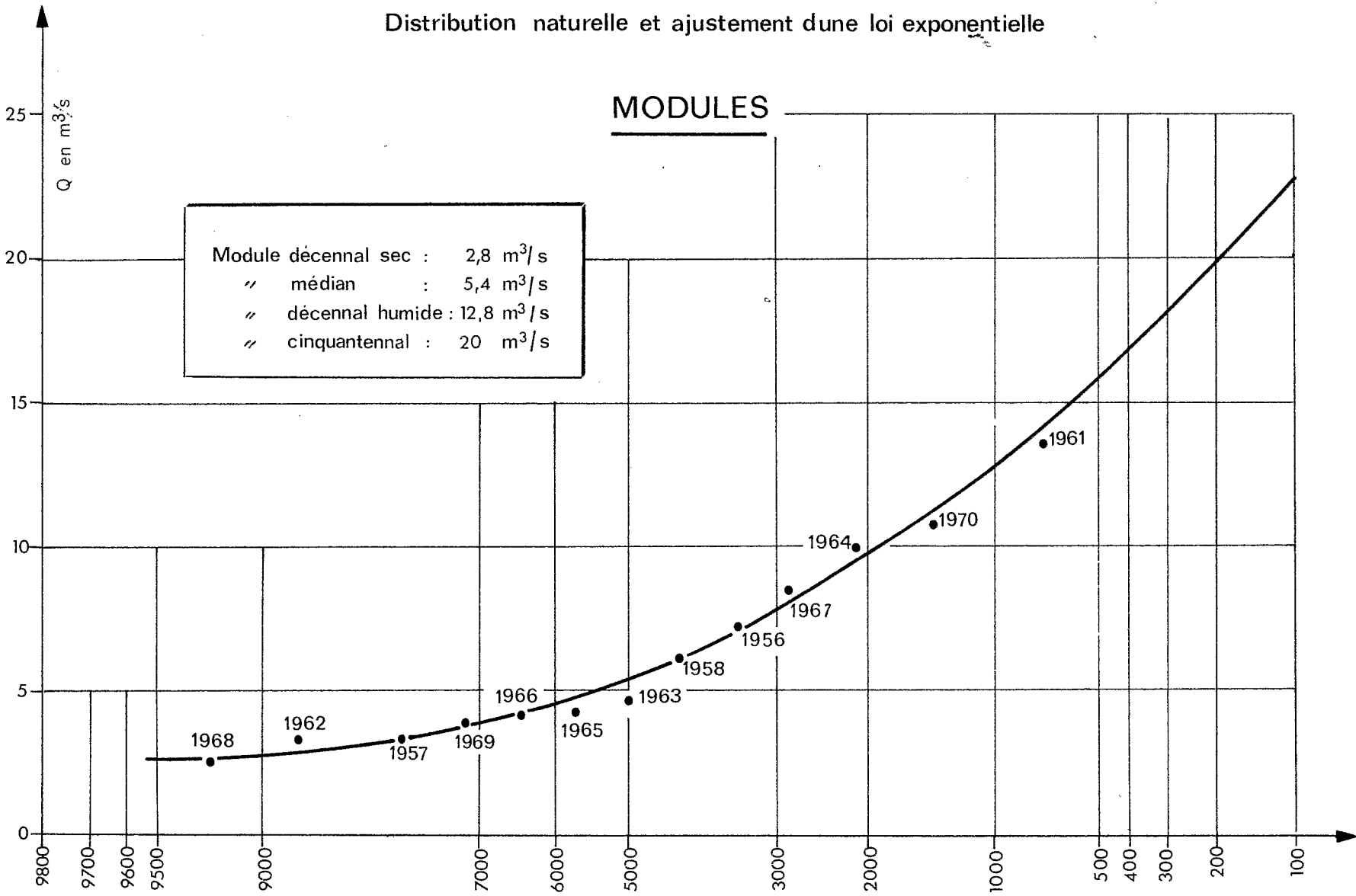
Il est également possible d'ajuster graphiquement une loi exponentielle à la distribution naturelle des quatorze débits maximaux annuels (cf. graphique 9).

Les valeurs suivantes ont été estimées :

- Débit maximal médian	:	180	m ³ /s	:
- Débit maximal décennal	:	430	m ³ /s	:
- Débit maximal centennal	:	780	m ³ /s	:

GOULBI DE MARADI A MADAROUNFA

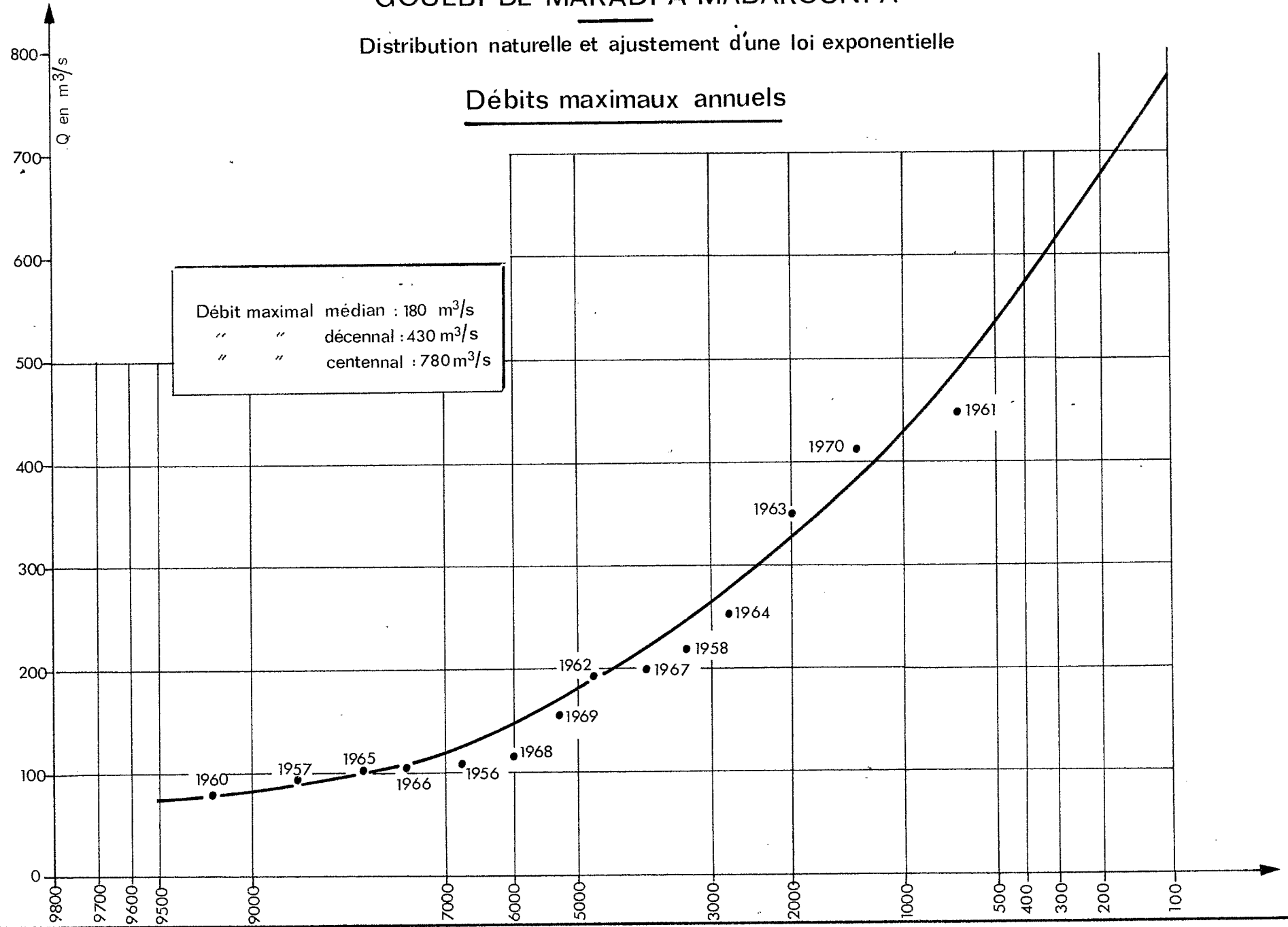
Distribution naturelle et ajustement d'une loi exponentielle



GOULBI DE MARADI A MADAROUNFA

Distribution naturelle et ajustement d'une loi exponentielle

Débits maximaux annuels



3.1.2 NIELLOUA

Les hauteurs ont été traduites en débits pour les années 1965 à 1970.

Les débits moyens mensuels et les modules sont les suivants en m^3/s :

: Année :	Maï :	Juin :	Juillet :	Août :	Septembre :	Octobre :	Novembre :	Module :
: 1965 :	0 :	2,09 :	5,96 :	27,3 :	10,7 :	0,27 :	0 :	3,86 :
: 1966 :	0 :	0,47 :	8,62 :	11,6 :	23,0 :	8,53 :	0 :	4,35 :
: 1967 :	0 :	9,91 :	29,6 :	41,8 :	31,6 :	4,08 :	0 :	9,82 :
: 1968 :	0,15 :	4,31 :	19,3 :	10,5 :	1,93 :	0,12 :	0 :	3,06 :
: 1969 :	0 :	7,35 :	13,6 :	16,5 :	10,3 :	2,65 :	0 :	4,22 :
: 1970 :	0 :	0,43 :	22,6 :	(51) :	44,8 :	3,22 :	0 :	10,4 :
: Moyenne :								
: interan-	0,02 :	4,1 :	16,6 :	26,4 :	20,4 :	3,15 :	0 :	5,95 :
: muelle :								

Les modules annuels sont très voisins de ceux observés à MADAROUNFA (qui est à 30 km à l'aval). Les écarts sont dus aux pertes par épandage entre les deux stations qui ne sont généralement pas compensées par les apports intermédiaires.

Le module interannuel est très voisin du module calculé à MADAROUNFA pour les six dernières années ($5,70 m^3/s$). En raison de la quasi-linéarité de la régression entre les modules aux deux stations, il est possible d'estimer les valeurs des modules de diverses récurrences à NIELLOUA.

: - Module médian :	5,7 m^3/s :
: - Module décennal sec :	3,0 m^3/s :
: - Module décennal humide :	13,5 m^3/s :

Les débits de crue maximaux évalués à partir des relevés de hauteurs limnimétriques sont les suivants :

: 1957 :	92 m^3/s ::	1964 :	216 m^3/s :
: 1958 :	206 " ::	1965 :	128 " :
: 1959 :	(292) " ::	1966 :	91 " :
: 1961 :	835 " ::	1967 :	351 " :
: 1962 :	192 " ::	1968 :	253 " :
: 1963 :	462 " ::	1969 :	230 " :
		1970 :	527 " :

Pour les débits supérieurs à $300 \text{ m}^3/\text{s}$, il s'agit d'estimations basées sur une extrapolation analytique de la courbe de tarage. Le débit maximal de 1959 n'est pas absolument sûr car, pour cette année, seuls les relevés d'août ont été effectués.

A ces treize valeurs, il est possible d'ajuster une loi exponentielle et d'estimer les valeurs des débits maximaux de diverses récurrences (graphique 10).

: - Débit maximal médian	:	235 m^3/s	:
: - Débit maximal décennal	:	640 "	:
: - Débit maximal centenal	:	1 200 "	:

On notera qu'il n'existe pas de corrélation étroite entre les débits de crue maximaux qui sont observés dans la même journée à NIELLOUA et à MADAROUNFA. La déformation des hydrogrammes et l'amortissement que subissent les ondes de crues dépendent beaucoup des conditions initiales de remplissage du lit mineur, de la forme de l'hydrogramme à NIELLOUA et de la proportion du débit global qui s'écoule par les zones de débordement.

3.2 Le GOULBI de GABI

Les débits moyens journaliers à la station de BARGAYA sont connus pour sept années (1962-1966 et 1968-1969).

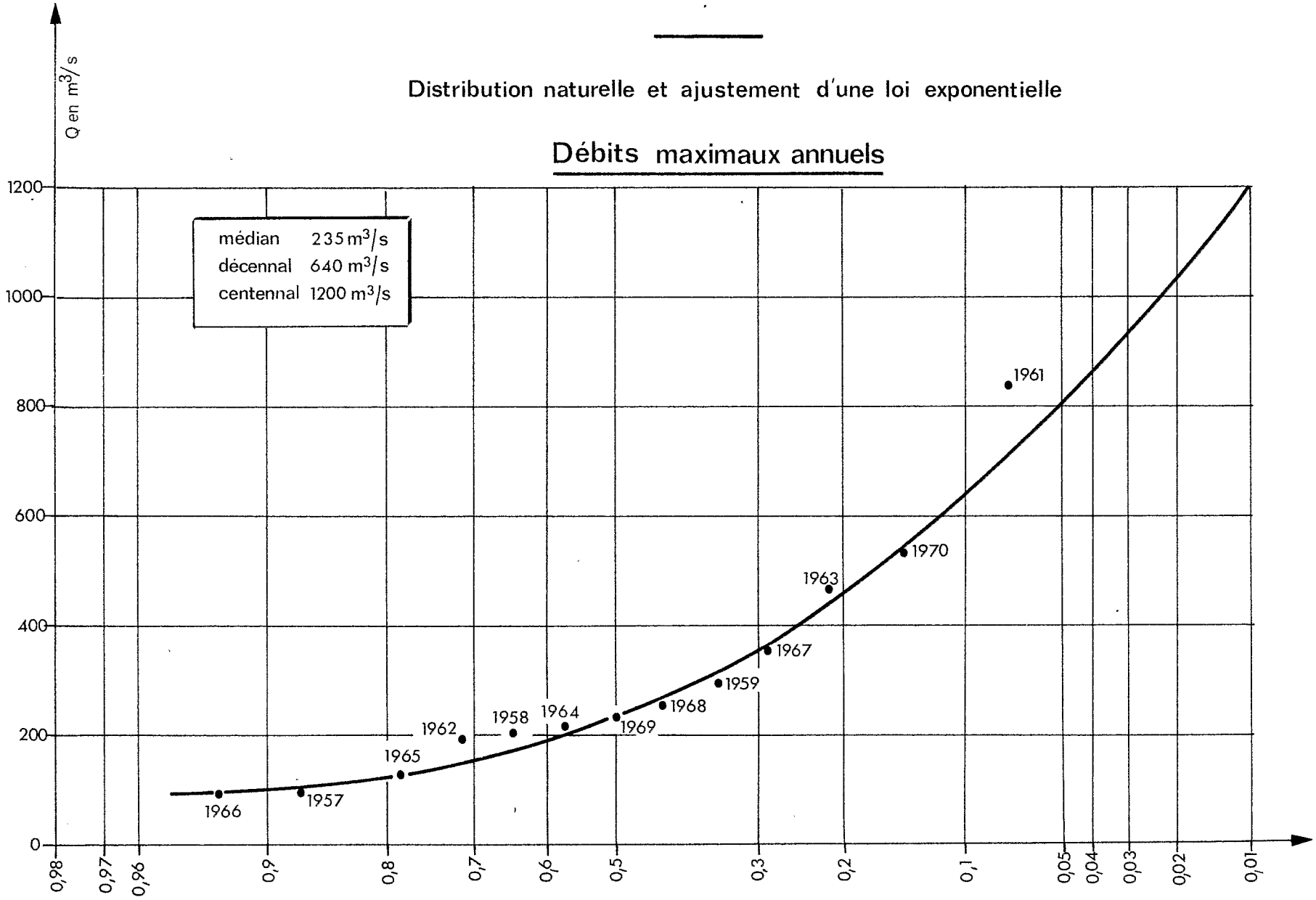
D'autre part une corrélation assez étroite existe entre les modules du GOULBI de GABI et les gains en volume du lac de MADAROUNFA (cf. graphique 13). Cette corrélation, qui s'explique naturellement par le rôle prépondérant que jouent les apports du GOULBI de GABI dans l'alimentation du lac, permet d'estimer les modules du GOULBI de GABI, pour les années où les relevés sont incomplets ou n'ont pas été effectués, à partir des relevés à l'échelle du lac (depuis 1956).

Les résultats (débits moyens mensuels et modules en m^3/s) sont rassemblés dans le tableau ci-après. Les valeurs estimées sont entre parenthèses.

GOULBI DE MARADI A NIELLOUA

Distribution naturelle et ajustement d'une loi exponentielle

Débits maximaux annuels



Année	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Module
1956	-	-	-	-	-	-	(0,54)
1957	-	-	-	-	-	-	(0,30)
1958	-	-	-	-	-	-	(0,64)
1959	-	-	-	-	-	-	-
1960	-	-	-	-	-	-	(0,54)
1961	-	-	-	-	-	-	(0,70)
1962	0	0,01	1,33	0,78	1,39	0	0,29
1963	0	0,31	1,46	4,02	0,77	0,23	0,58
1964	0	0	0,52	4,41	1,12	0	0,51
1965	0	(0,58)	(0,71)	1,76	1,12	0	0,35
1966	0	0	1,37	0,35	1,77	0	0,29
1967	-	-	-	-	-	-	(0,54)
1968	0	0,04	1,20	0,33	0,31	0	0,16
1969	0	0,44	1,07	0,68	0,34	0,04	0,22
1970	0	0	1,09	(4,0)	(1,4)	0	(0,55)
Moyenne interannuelle	0	0,17	0,97	2,04	1,02	0,03	0,44

Le module spécifique interannuel est de 0,63 l/s.km².

La pluviométrie moyenne interannuelle peut être estimée à 700 mm et le coefficient d'écoulement interannuel est voisin de 3 %.

Aux quatorze modules observés ou estimés il est possible d'ajuster graphiquement une loi normale à partir de laquelle peuvent être évalués les modules de différentes récurrences (graphique 11).

- Module en année médiane	0,44 m ³ /s
- Module en année décennale sèche	0,21 "
- Module en année décennale humide	0,67 "

Les débits maximaux annuels observés sont les suivants :

1962	22,5 m ³ /s	1966	26,5 m ³ /s
1963	37 "	1968	25,5 "
1964	20,9 "	1969	32,5 "
1965	17,8 "		

L'échantillon est restreint mais peu dispersé. Il est possible d'y ajuster assez correctement une loi à tendance légèrement exponentielle (graphique 11) qui fournit les valeurs provisoires suivantes :

:- Débit maximal médian	:	25	m ³ /s	:
:- Débit maximal décennal	:	40	"	:

3.3 Le lac de MADAROUNFA

Nous disposons de quatorze années de relevés à l'échelle du lac (1956 à 1959, 1960 à 1971). Ces relevés sont à peu près complets. Le tableau I présente les hauteurs à l'échelle au 15 de chaque mois. Certaines hauteurs ont pu être estimées soit par interpolation pour les courtes périodes sans relevés des mois de hautes eaux, soit en utilisant la courbe de décrue du lac qui est, nous le verrons ci-dessous, très régulière.

Les points représentatifs des hauteurs du lac (hauteurs au 15 du mois, maximum annuel) sont portés sur le graphique 12.

La cote minimale du lac se situe généralement en juin et plus rarement en juillet (H = 050 à 060 cm). Les apports du GOULBI de GABI, du GOULBI de MARADI (par l'intermédiaire du canal ou par débordements) font rapidement monter le niveau du lac. Le maximum se situe entre le 1er août et le 15 septembre. Les cotes maximales observées sont les suivantes :

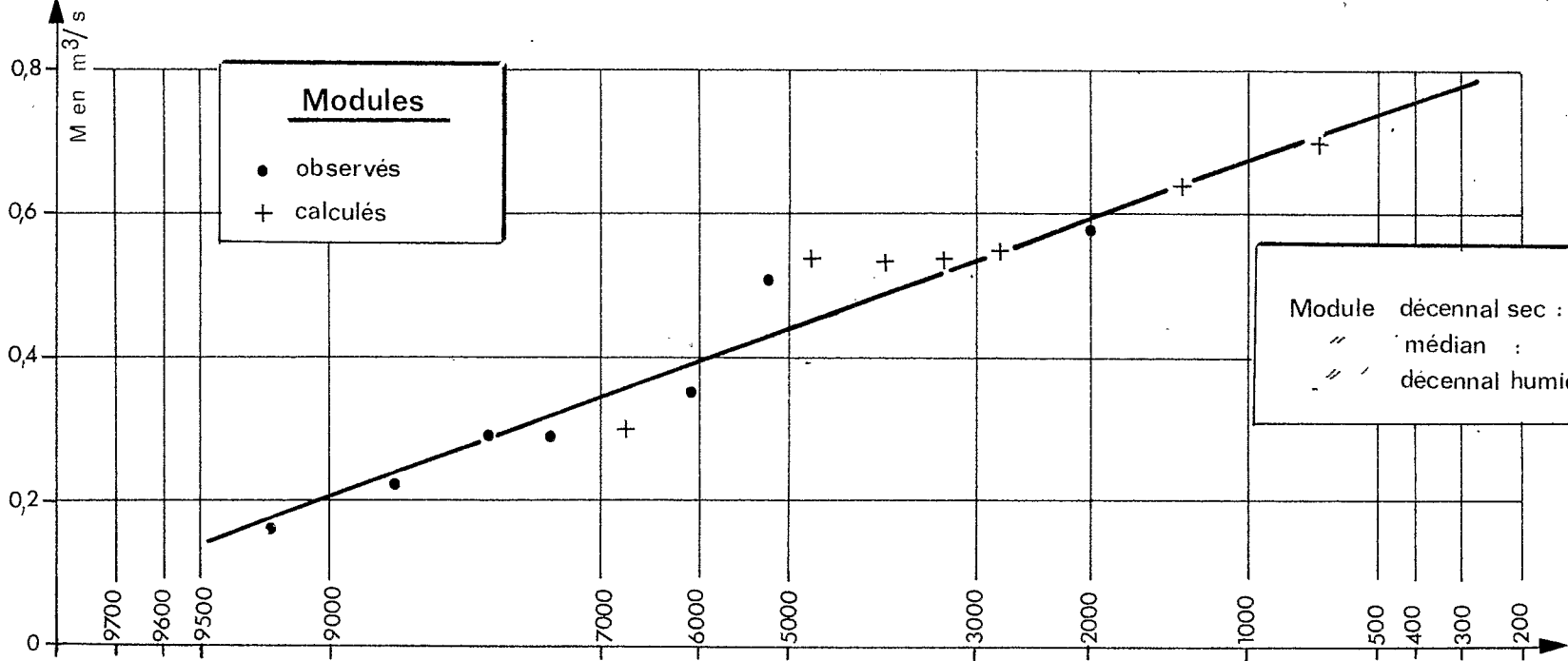
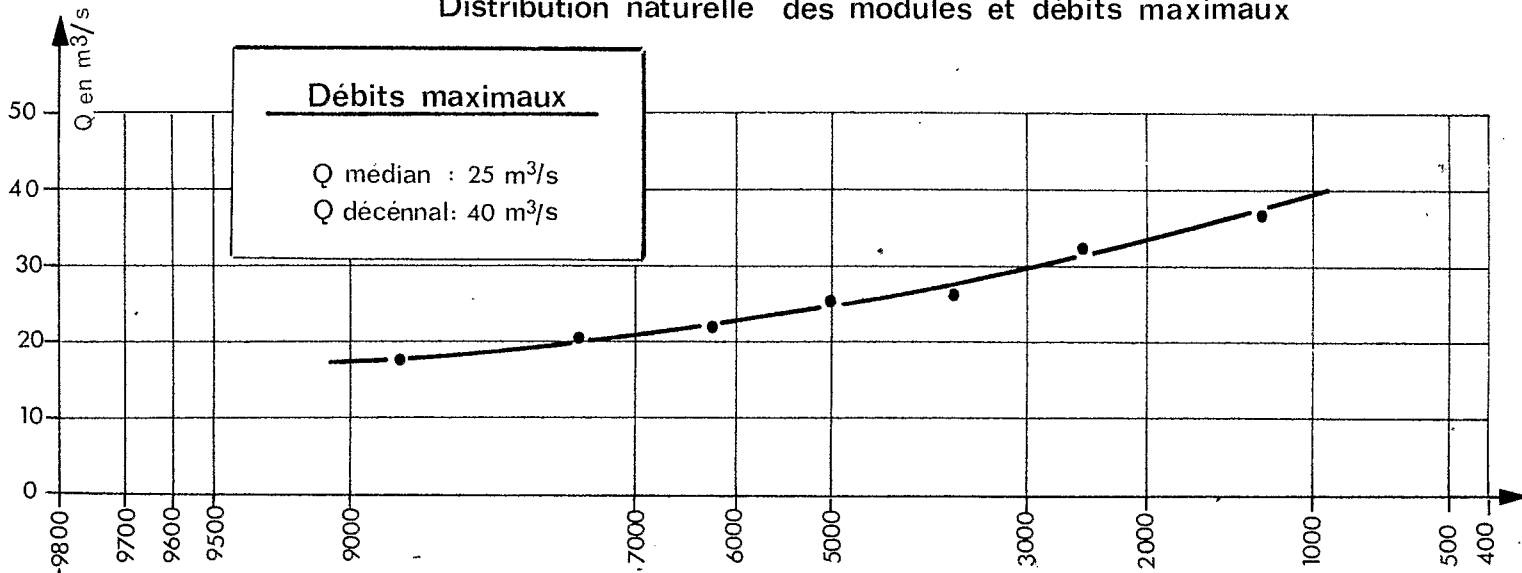
H cm	Date	H cm	Date
356	8-8-1956	347	3-9-1964
277	5-9-1957	268	15-9-1965
412	20-8-1958	277	21-9-1966
365	28-8-1960	381	26-8-1967
430	13-8-1961	215	5-9-1968
266	23-8-1962	224	9-9-1969
394	24-8-1963	358	2-8-1970

La cote maximale médiane est H = 350 cm.

Puis les apports ne compensent plus les pertes par le canal vers le GOULBI de MARADI et le niveau descend assez rapidement (H = 200 à 250 cm en fin septembre). En octobre le lac perd encore une quarantaine de centimètres tant par le canal que par évaporation. Ensuite de novembre à mai, les pertes sont presque entièrement dues à l'évaporation sur la nappe. Les pertes moyennes journalières sont de 5,5 à 6,5 mm de novembre à mars, puis de 7,3 à 7,7 mm jusqu'en juin.

GOULBI DE GABI A BARGAYA

Distribution naturelle des modules et débits maximaux



LAC DE MADAROUNFA

HAUTEURS A L'ECHELLE

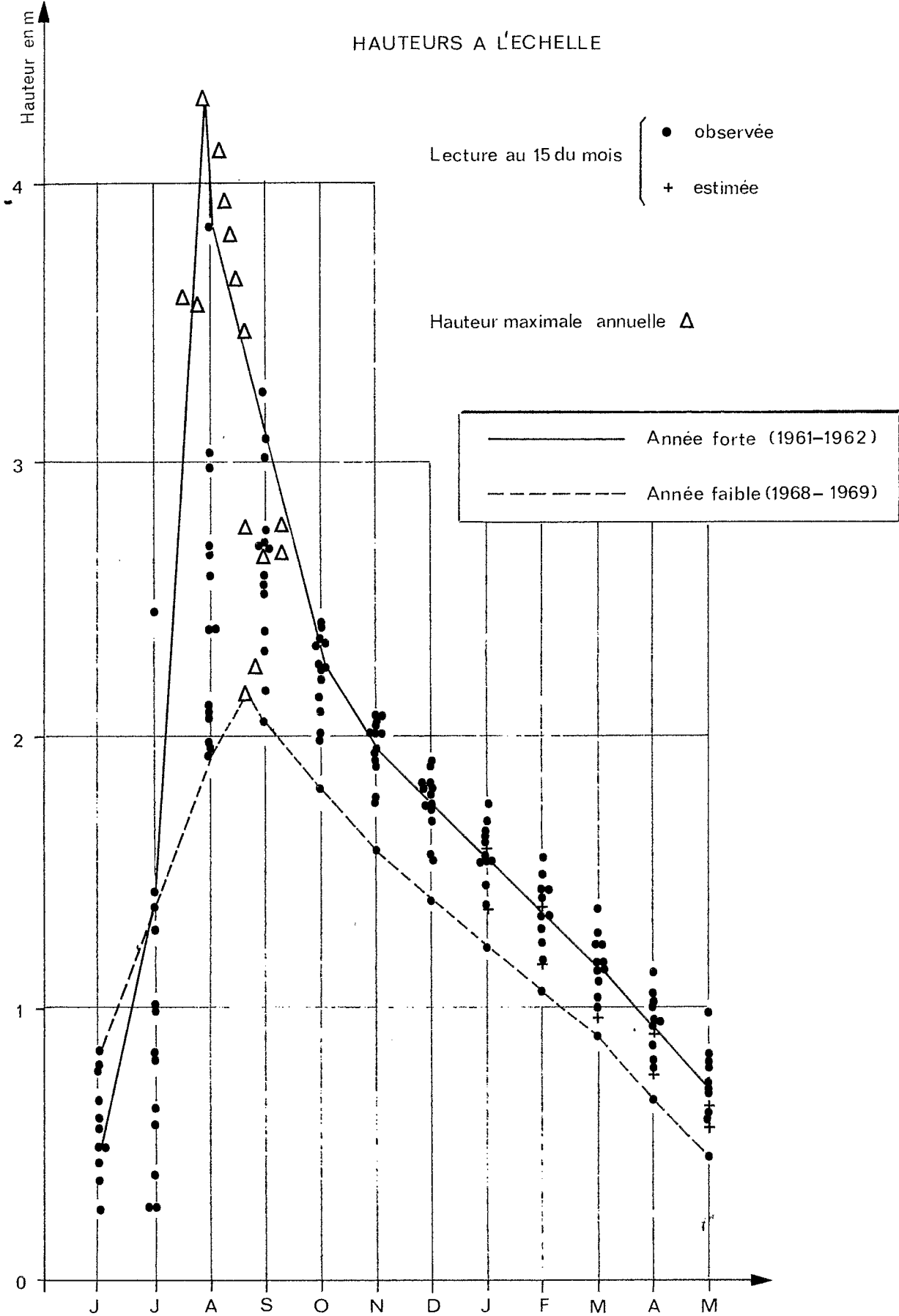


TABLEAU I

LAC de MADAROUNFA

Hauteur à l'échelle au 15 du mois
(cm)

: Année :	Jun:	Juil:	Août:	Sept:	Oct :	Nov :	Déc :	Janv :	Févr :	Mars :	Avril:	Mai :
:1956-1957:	: 027:	: 303:	: 258:	: 220 :	: 190 :	: 168 :	: 145 :	: 123 :	: 103 :	: 081 :	: 059 :	:
:1957-1958:	058:	063:	211:	275:	239 :	200 :	174 :	153 :	128 :	109 :	086 :	061 :
:1958-1959:	043:	039:	238:	257:	208 :	175 :	154 :	(136):	(116):	(096):	(076):	(056):
:1959-1960:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:1960-1961:	:	:	298:	230:	(200):	189 :	178 :	(158):	(136):	(115):	(090):	(070):
:1961-1962:	049:	142:	385:	308:	223 :	194 :	173 :	153 :	133 :	113 :	091 :	069 :
:1962-1963:	049:	057:	206:	238:	225 :	200 :	182 :	161 :	140 :	116 :	096 :	072 :
:1963-1964:	079:	100:	238:	270:	240 :	207 :	188 :	168 :	149 :	127 :	105 :	083 :
:1964-1965:	066:	081:	266:	325:	235 :	200 :	180 :	162 :	143 :	123 :	100 :	078 :
:1965-1966:	077:	128:	209:	268:	224 :	(205):	(180):	153 :	133 :	113 :	093 :	(073):
:1966-1967:	056:	083:	194:	252:	234 :	203 :	182 :	163 :	143 :	122 :	101 :	081 :
:1967-1968:	059:	245:	258:	301:	234 :	207 :	190 :	175 :	155 :	136 :	113 :	098 :
:1968-1969:	084:	137:	192:	204:	180 :	158 :	139 :	122 :	105 :	089 :	066 :	045 :
:1969-1970:	026:	099:	196:	216:	199 :	176 :	155 :	137 :	117 :	100 :	078 :	056 :
:1970-1971:	037:	027:	269:	268:	214 :	193 :	173 :	155 :	135 :	117 :	095 :	:
: Médiante :	056:	083:	238:	263:	225 :	198 :	178 :	155 :	135 :	115 :	093 :	070 :

Les cotes mensuelles médianes du lac sont indiquées dans le tableau I.

Le bilan hydrologique du lac de MADAROUNFA peut être schématisé par l'équation :

$$\text{: (Agg + Agm + Acm + P \pm S) - (Dcm + E \pm S) = \Delta V \quad \text{:}$$

La première parenthèse groupe les apports (eaux de surface et pluviométrie), la seconde les pertes (déversement du lac vers le GOULBI de MARADI et évaporation). Le second terme de l'équation représente, pour une période donnée Δt (le jour, le mois, l'année), la variation du stock.

3.3.1 Estimation des apports

GOULBI de GABI (Agg)

Les apports annuels du GOULBI de GABI peuvent être estimés en année médiane à 14 millions de m^3 (module médian $0,44 m^3/s$). En dix ans (1961-1970) les plus forts apports sont estimés à 22 millions de m^3 en 1961, les plus faibles à 5 millions de m^3 en 1968.

Le GOULBI de GABI participe essentiellement à l'alimentation du lac où il vient se déverser. Une régression graphique (graphique 13) a pu être établie entre les apports annuels du GOULBI de GABI et les gains maximaux annuels du lac. Cette régression a permis d'estimer les apports annuels du GOULBI de 1956 à 1961 et en 1967 et 1970 (années où les observations sont incomplètes).

GOULBI de MARADI (Agm + Acm)

Les apports annuels du GOULBI de MARADI par l'intermédiaire du Canal de MADAROUNFA (Acm) sont difficiles à chiffrer en l'absence de jaugeages. On peut estimer que ces apports, pendant la première partie de la saison des pluies, représentent environ 1/10 des apports du GOULBI de GABI, soit 1 million de m^3 environ.

Pour les cotes supérieures à 2 m à l'échelle du pont de MADAROUNFA (1,85 m en 1970), le GOULBI de MARADI déborde largement sur ses deux rives. En rive gauche, une partie des débordements (Agm) se dirige directement vers l'aval et une large fraction rejoint le lac pour un stockage momentané. Il est également très difficile de chiffrer ces apports. Les quelques jaugeages effectués pour une hauteur supérieure à 2 m permettent d'estimer le pourcentage du débit total qui s'écoule en rive gauche. En appliquant ce pourcentage aux débits moyens journaliers des jours où ont lieu les débordements, il est possible d'évaluer assez grossièrement le volume des apports par débordements. C'est ainsi qu'en 1961, pour une cote maximale de 2,56 m à l'échelle du pont de MADAROUNFA, les débordements en rive gauche des 12 et 13 août peuvent être estimés à une dizaine de millions de m^3 . A la même date, la cote du lac est passée de 2,26 m à 4,30 m, soit un gain en volume de 12 millions de m^3 .

Précipitations (P * S)

La pluviométrie sur le lac peut être estimée à partir du pluviomètre installé au village de MADAROUNFA. En sommant les précipitations mensuelles multipliées par la surface (S) moyenne du lac pour chaque mois, il est possible d'estimer les apports directs au lac à 2 à 2,5 millions de m³ en année médiane (P = 550 mm).

3.3.2 Estimation des pertes

Ecoulement vers le GOULBI de MARADI (D_{cm})

Vers le milieu de la saison des pluies, avant que la cote soit maximale, les eaux du lac se trouvent à un niveau supérieur à celui des eaux du GOULBI de MARADI. Le sens du courant s'inverse dans le Canal de MADAROUNFA et le lac déverse son trop-plein vers le GOULBI de MARADI. En l'absence de mesures de débit, rendues d'ailleurs difficiles à exécuter en raison des nombreux barrages à poissons édifiés par les pêcheurs de MADAROUNFA, il est impossible de chiffrer directement le volume de ces pertes.

Evaporation (E * S)

Les données recueillies sur le bac Colorado de la station IRAT de TARNA permettent, en employant un facteur de correction (0,8), d'estimer les lames d'eau évaporées sur le lac.

L'évaporation annuelle sur le lac peut être ainsi évaluée entre 2,20 et 2,30 m ainsi répartie :

570 mm en saison des pluies (juin-septembre) soit 4,7 mm/j en moyenne

950 mm pendant la première partie de la saison sèche (octobre-février)
soit 6,3 mm/j

710 mm pendant la seconde partie de la saison sèche (mars-mai)
soit 7,7 mm/j

Infiltrations

Les infiltrations en profondeur peuvent être considérées comme négligeables. Les formations encaissantes sableuses doivent avoir une certaine capacité de rétention. Ces formations emmagasinent un certain volume d'eau au cours de la montée du lac qu'elles restituent en partie après la saison des pluies, jouant ainsi un rôle d'amortissement.

3.3.3 Bilan hydrologique du lac

Les données recueillies de 1961 à 1970 permettent d'établir à partir de l'équation :

$$(A_{gg} + A_{gm} + A_{cm} + P * S) - (D_{cm} + E * S) = \Delta V$$

un bilan approximatif du lac mois par mois.

Signalons cependant que, contrairement à la méthode classique où l'évaporation est le terme résiduel, les apports et les pertes par le canal de MADAROUNFA (A_{cm} et D_{cm}), qui ne peuvent être chiffrés directement, seront estimés par différence, tous les autres termes pouvant être évalués. D'autre part, les apports du GOULBI de GABI en 1961, 1967 et partiellement en 1970, ont été estimés à partir des gains en volume du lac (graphique 13). Il est évident, dans ces conditions, que le bilan pour ces trois années n'est donné qu'à titre indicatif.

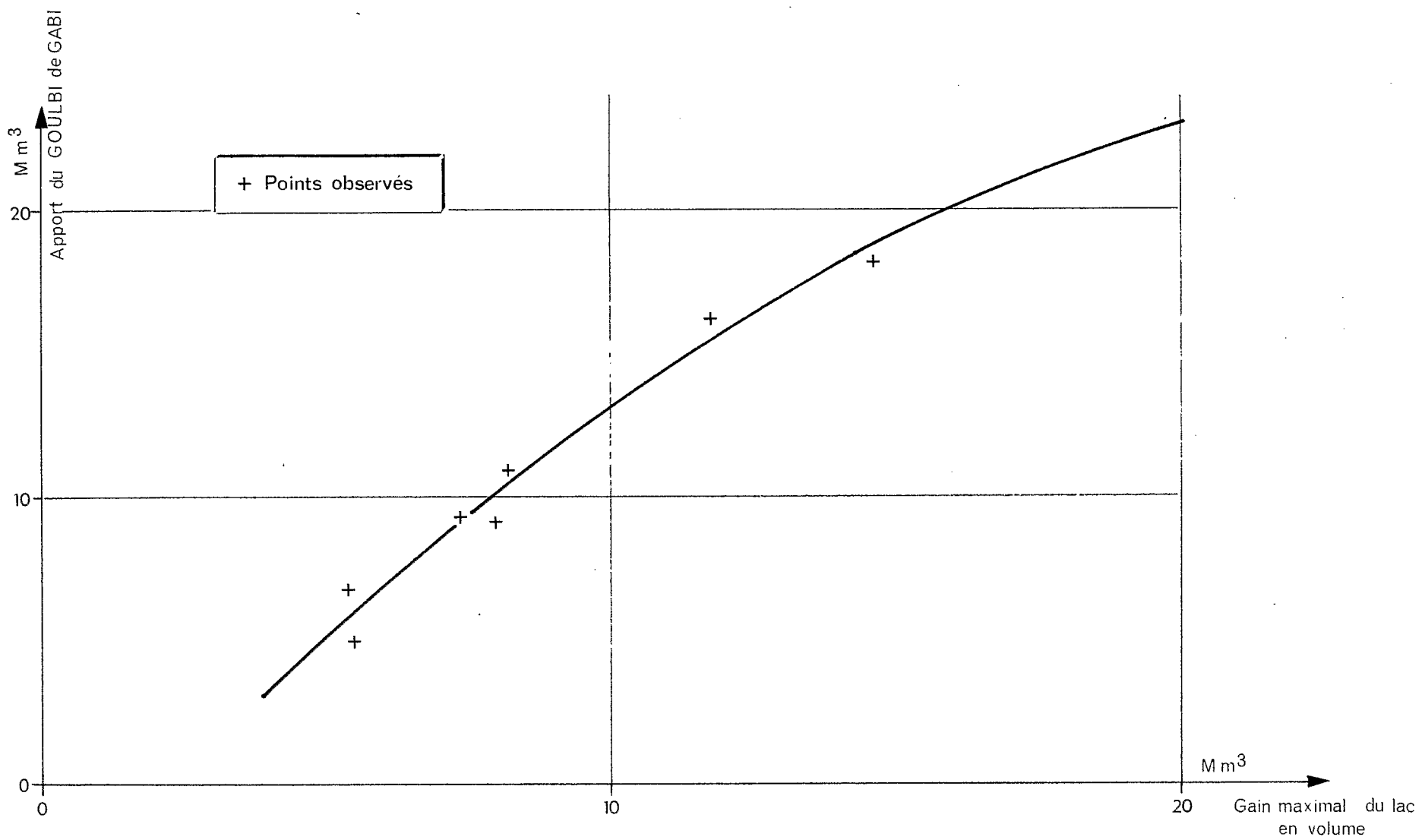
Les tableaux ci-dessous, qui présentent les données mensuelles et annuelles du lac de 1961 à 1970, comportent les colonnes suivantes :

- 1 S en km² Surface moyenne du lac pour le mois considéré
- 2 GG Apports mensuels du GOULBI de GABI (en millions de m³)
- 3 GM Estimation des apports par débordements en rive gauche du GOULBI de MARADI (en millions de m³)
- 4 P Pluviométrie mensuelle (en mm)
- 5 P x S Apports pluviométriques (en millions de m³)
- 6 CM Apports (+) ou pertes (-) par le canal de MADAROUNFA. Ce terme est évalué par différence, les autres termes de l'équation étant estimés directement (en millions de m³)
- 7 E Evaporation mensuelle (en mm). De 1961 à 1965, les moyennes mensuelles de la période 1966-1970 ont été utilisées
- 8 E x S Pertes par évaporation (en millions de m³)
- 9 V Volume du lac à la fin du mois ou de la période (en millions de m³)
- 10 ΔV Variation du stock (+ et -) entre le début et la fin de la période considérée

Année 1961-1962

Période	1 S	2 GG	3 GM	4 P	5 P x S	6 CM	7 E	8 E x S	9 V	10 ΔV
Jun	1,0			96	0,1		(198)	0,2	1,2	+0,8
Juillet	3,2			132	0,4		(152)	0,5	3,3	+2,1
Août	5,2		(12)	374	2,0		(110)	0,55	11,1	+7,8
Septembre	5,8		(13)	65	0,4		(110)	0,65	6,9	-4,2
1er Juin - 30 Sept:		(22)	(25)	667	2,9	(-42)	(570)	(1,9)	6,9	+6,5
Octobre	4,8					(-1,5)	(170)	(0,8)	4,5	-2,4
1er Nov - 31 Mai	4,3/1,3						(1 480)	(3,9)	0,8	-3,7
Année		(22)	(25)	667	2,9	(-46)	(2 220)	6,6	0,8	+0,4

Correspondance entre les apports annuels du GOULBI de GABI
 et le gain maximal en volume du lac de MADAROUNFA



Le volume maximal emmagasiné par le lac (pour une très courte période) est de 19,5 millions de m³ à la suite des débordements importants du 13 août 1961. La balance pluie-évaporation est positive (1 million de m³) pour la durée de la saison des pluies. On notera que les pertes par évaporation du 1er novembre au 31 mai sont calculées de la façon suivante :

$$E.S = (770 \text{ mm} \times 3,6 \text{ km}^2) + (710 \text{ mm} \times 1,8 \text{ km}^2) = 3,6.10^6 \text{ m}^3$$

- 770 mm évaporation totale moyenne du 1er septembre au 28 février
- 3,6 km² surface moyenne du lac pour la même période
- 710 mm évaporation totale moyenne du 1er mars au 31 mai
- 1,8 km² surface moyenne du lac pour la même période

La valeur obtenue est très proche du déstockage (-3,7 millions de m³) du lac au cours de la même période.

On notera enfin qu'à l'issue de la saison des pluies, le gain en volume du lac (6,5 millions de m³) ne représente que 13 % des apports totaux estimés il est vrai de façon assez sommaire.

Année 1962-1963

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	S	GG	GM	P	P x S	CM	E	E x S	V	Δ V
Jun	1,0	-	-	30	-	0	(198)	0,2	0,6	-0,2
Juillet	1,1	3,6	(0,25)	174	0,2	(-0,4)	(152)	0,15	4,0	+3,4
Août	4,7	2,1	-	198	0,9	-0,5	(110)	0,5	6,0	+2,0
Septembre	5,0	3,6	-	122	0,6	-2,5	(110)	0,55	7,2	+1,2
1er Juin - 30 Sept:		9,3	(0,25)	524	1,7	-3,4	(570)	(1,4)	7,2	+6,4
Octobre	4,8	-	-	3	-	0	(170)	(0,8)	6,5	-0,7
1er Nov - 31 Mai	4,6/1,1	-	-	-	-	-	(1 480)	(4,1)	0,8	-5,7
Année		9,3	(0,25)	527	1,7	-3,4	(2 220)	6,3	0,8	0

En 1962, le volume maximal emmagasiné le 23 août est de 8,1 millions de m³. Les débordements du GOULBI de MARADI apportent un volume négligeable.

Les apports par le canal sont peu importants. Les pertes (0,4 millions de m³) de juillet sont fictives et dues à l'imprécision des termes du bilan. En octobre le lac a continué en réalité à se déverser mais les pertes du lac sont dues en grande majorité à l'évaporation.

Le gain en volume du lac au 30 septembre représente près de 60 % des apports.

Année 1963-1964

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	S	GG	GM	P	P x S	CM	E	E x S	V	ΔV
Juin	1,5	0,8		69	0,1	-	(198)	0,3	1,0	+0,2
Juillet	2,5	3,9	(0,5)	217	0,5	(-1,2)	(152)	0,4	4,3	+3,3
Août	5,0	10,7	(10)	191	1,0	-14	(110)	0,55	11,5	+7,2
Septembre	5,5	2,0		72	0,4	-6,2	(110)	0,6	7,1	-4,4
1er Juin - 30 Sept		17,5	(10,5)	549	2,0	-21,4	(570)	(1,85)	7,1	6,3
Octobre	5,0	0,7		62	0,3	-1,2	(170)	(0,8)	5,7	-1,4
1er Nov - 31 Mai	4,5/1,2						(1 480)	(4,0)	0,9	-4,8
Année		18,2	(10,5)	611	2,3	-22,6	(2 220)	6,6	0,9	+0,1

Le volume maximal emmagasiné est de 15,6 millions de m³ le 24 août et correspond aux apports par débordement du GOULBI de MARADI s'ajoutant aux apports importants du GOULBI de GABI en août. Le gain en volume du lac au 30 septembre représente 23 % des apports.

Année 1964-1965

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	S	GG	GM	P	P x S	CM	E	E x S	V	ΔV
Juin	1,2	0		61	0,05	+0,4	(198)	0,2	1,1	+0,2
Juillet	2,5	1,4	(2,5)	225	0,55	-2,0	(152)	0,4	3,1	+2,0
Août	5,4	11,8	(6,5)	265	1,45	-10,4	(110)	0,6	11,8	+8,7
Septembre	5,8	2,9	(6,0)	77	0,45	-12,6	(110)	0,65	7,9	-3,9
1er Juin - 30 Sept		16,1	(15,0)	628	2,50	-24,6	(570)	(1,85)	7,9	7,0
Octobre	4,5	0		0	0	-1,7	(170)	(0,8)	5,4	-2,5
1er Nov - 31 Mai	4,4/1,1						(1 480)	(3,9)	0,9	-4,5
Année		16,1	(15,0)	628	2,5	-26	(2 220)	6,5	0,9	0

Le volume maximal du lac est de 13 millions de m³ le 3 septembre. Le gain en volume du lac au 30 septembre représente 22 % des apports totaux.

Année 1965-1966

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	S	GG	GM	P	P x S	CM	E	E x S	V	ΔV
Juin	1,5	(1,5)		137	0,2	(-0,8)	(198)	0,2	1,6	+0,7
Juillet	2,7	(1,9)		84	0,2	-1,3	(152)	0,4	2,2	+0,6
Août	4,4	4,7		228	1,0	-0,5	(110)	0,5	6,9	+4,7
Septembre	5,3	2,9		104	0,5	-2,8	(110)	0,6	6,9	0
1er Juin - 30 Sept:		11,0	0	553	1,9	-5,2	(570)	(1,7)	6,9	+6,0
Octobre	4,8			2		-1,0	186	0,9	5,0	-1,9
1er Nov - 31 Mai	4,5/1,1						1 310	3,5	0,7	-4,3
Année		11,0	0	555	1,9	-6,2	(2 070)	6,1	0,7	-0,2

Le volume maximal du lac, le 15 septembre, est de 9,4 millions de m³.
Le gain en volume en fin de saison des pluies représente 54 % des apports.

Année 1966-1967

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	S	GG	GM	P	P x S	CM	E	E x S	V	ΔV
Juin	1,1			42	-	+0,2	166	0,2	0,7	0
Juillet	2,0	3,7		139	0,3	+0,1	169	0,3	4,5	+3,8
Août	4,2	0,9		118	0,5	-0,6	119	0,5	4,8	+0,3
Septembre	5,2	4,6		199	1,0	-1,9	103	0,5	8,0	+3,2
1er Juin - 30 Sept:		9,2	0	520	1,8	-2,2	557	1,5	8,0	+7,3
Octobre	4,8			2	-	-1,8	142	0,7	5,5	-2,5
1er Nov - 31 Mai	4,4/1,1						1 501	4,0	0,7	-4,8
Année		9,2	0	522	1,8	-4,0	2 200	6,2	0,7	0

Le volume maximal du lac le 21 septembre est de 8,7 millions de m³.
Le gain en volume en fin de saison des pluies représente 77 % des apports.

Année 1967-1968

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	S	GG	GM	P	P x S	CM	E	E x S	V	Δ V
Juin	1,1			87	0,1		228	0,25	5,5	+4,8
Juillet	5,2			202	1,1		136	0,7	10,3	+4,8
Août	5,8		(0,3)	164	1,0		92	0,55	12,0	+1,7
Septembre	5,8			161	0,9		91	0,55	8,1	-3,9
1er Juin - 30 Sept:		(17)	(0,3)	614	3,1	(-11)	547	2,0	8,1	+7,4
Octobre	4,8			0		-1,7	159	0,8	5,6	-2,5
1er Nov - 31 Mai	4,5/1,5						1 310	3,7	1,1	-4,5
Année		(17)	(0,3)	614	3,1	(-12,7)	2 016	6,5	1,1	+0,4

Le volume maximal du lac est de 15 millions de m³, le 26 août. Le gain en volume du lac en fin septembre représente 40 % des apports.

Année 1968-1969

Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	S	GG	GM	P	P x S	CM	E	E x S	V	Δ V
Juin	1,5	0,1		78	0,1	0	173	0,25	1,1	0
Juillet	3,2	3,2		135	0,4	0	114	0,35	4,4	+3,3
Août	4,3	0,9		143	0,6	-0,1	121	0,5	5,3	+0,9
Septembre	4,4	0,8		80	0,4	-1,3	159	0,7	4,5	-0,8
1er Juin - 30 Sept:		5,0	0	462	1,5	-1,4	567	1,8	4,5	+3,4
Octobre	4,0			0	0	-0,2	203	0,8	3,5	-1,0
1er Nov - 31 Mai	3,6/0,9						1 550	3,3	0,5	-3,0
Année		5,0	0	462	1,5	-1,6	2 320	5,9	0,5	-0,6

Le volume maximal du lac est de 6,6 millions de m³ le 5 septembre. Le gain en volume du lac en fin septembre représente 72 % des apports.

Année 1969-1970

Période	1 S	2 GG	3 GM	4 P	5 P x S	6 CM	7 E	8 E x S	9 V	10 ΔV
Juin	1,0	1,1		69	0,1	-	190	0,2	0,9	+0,4
Juillet	2,0	2,9		137	0,3	+0,2	131	0,25	4,0	+3,1
Août	4,4	1,8		142	0,6	-0,7	104	0,45	5,3	+1,3
Septembre	4,6	0,9		92	0,4	-0,8	125	0,55	5,3	0
1er Juin - 30 Sept:		6,7	0	440	1,4	-1,3		1,4	5,3	+4,8
Octobre	4,4	0,1		11	-	-0,2	141	0,6	4,5	-0,8
1er Nov - 31 Mai	3,9/1,0						1 555	3,6	0,8	-3,7
Année		6,8	0	451	1,4	-1,5		5,6	0,8	+0,3

Le volume maximal du lac est de 5,8 millions de m³ le 9 septembre.
Le gain en volume du lac au 30 septembre représente 72 % des apports.

Année 1970-1971

Période	1 S	2 GG	3 GM	4 P	5 P x S	6 CM	7 E	8 E x S	9 V	10 ΔV
Juin	0,8			14	-		254	0,2	0,5	-0,3
Juillet	0,6	2,6	(5,5)	298	0,2		211	0,1	13,0	+12,5
Août	5,4	(10,7)	(3,8)	282	1,5		111	0,6	10,0	-3,0
Septembre	5,4	3,7	(4,7)	135	0,7		110	0,6	7,2	-2,8
1er Juin - 30 Sept:		(17)	(14)	729	2,4	(-26)	686	1,3	7,2	+6,4
Octobre	4,6			0		-1,4	(170)	(0,8)	5,0	-2,2
1er Nov - 31 Mai	4,3/1,4						(1 480)	(3,9)	0,8	-4,2
Année		(17)	(14)	729	2,4	(-27)	(2 340)	(6,0)	0,8	0

Le volume maximal du lac est de 13,5 millions de m³ le 2 août. Le gain en volume enregistré en juillet s'effectue dans les tout derniers jours du mois. Le gain en fin septembre représente 20 % environ des apports nets.

Les différents termes des bilans présentés ci-dessus sont déterminés avec plus ou moins de précision :

Les valeurs les plus sûres concernent les apports du GOULBI de GABI et, la pluviométrie sur le lac.

L'évaporation est moins bien déterminée et paraît sous-estimée (en comparant les pertes estimées pour la période du 1er novembre au 31 mai et le déstockage du lac pour la même période).

Il est également possible qu'au cours de cette période des pertes par infiltration ou écoulement vers de petites dépressions voisines du lac s'ajoutent aux pertes par évaporation.

Les évaluations des surfaces et volumes du lac sont liées à la qualité des courbes de superficie et cubature du lac qui manquent encore de précision.

Enfin l'estimation des apports par débordements, en provenance du GOULBI de MARADI, est assez grossière.

Le terme résiduel, c'est-à-dire les volumes qui transitent par le canal de MADAROUNFA, comporte donc une marge d'erreur assez importante. Très souvent, pour juin et juillet, ce terme est négatif (pertes vers le GOULBI). Lorsque les observations (sur le sens du courant) effectuées sur le canal étaient en contradiction avec la valeur calculée, nous n'avons pas tenu compte de cette valeur. Il est cependant permis d'en conclure que les apports vers le lac par l'intermédiaire du canal ne représentent qu'une faible partie des apports totaux.

Dans ces conditions, les bilans présentés ne peuvent être équilibrés d'une façon rigoureuse. Mais il s'agissait en réalité d'apprécier l'ordre de grandeur des différents termes. Les données recueillies sont suffisantes pour établir le mécanisme du lac.

Au début de la saison des pluies (juin) la cote du lac est comprise entre 0,30 et 0,80 m (ce qui représente un volume emmagasiné de 0,5 à 1 million de m³). Pendant la première partie de la saison des pluies, les apports du GOULBI de GABI, grossis des apports beaucoup moins importants du canal de MADAROUNFA, font monter assez rapidement le niveau du lac, par paliers successifs. Avant que le niveau du lac atteigne son maximum (2,20 à 4,20 m), le courant s'inverse dans le canal de MADAROUNFA. Les gains en volume du lac représentent alors la différence entre les apports du GOULBI de GABI et les pertes par le canal. Le maximum correspond au point d'équilibre (généralement pendant la première quinzaine de septembre). A ces apports s'ajoutent, certaines années, les débordements du GOULBI de MARADI qui provoquent des hausses rapides du niveau mais le stockage de ces apports est momentané. Les apports pluviométriques et les pertes par évaporation s'équilibrent pratiquement pour la période juin - septembre (les années de forte hydraulité la pluviométrie plus importante et l'évaporation plus faible peuvent laisser un solde positif de 1 million de m³ environ).

A la fin de la saison des pluies, le volume emmagasiné dans le lac est compris entre 4,5 et 8 millions de m³. Le gain en volume du lac (3,5 à 7,5 millions de m³) représente 20 à 70 % des apports totaux ou, si l'on considère que les apports du GOULBI de MARADI sont ou négligeables ou momentanés, 30 à 50 % des apports du GOULBI de GABI.

En octobre les pertes représentent 1 à 2 millions de m^3 répartis entre les pertes par le canal et les pertes par évaporation (0,8 millions de m^3 en moyenne). L'écoulement par le canal cesse en général à la fin du mois d'octobre (cote du lac 2,10 m).

De fin octobre à fin mai, les pertes du lac sont de 3 à 5 millions de m^3 . La comparaison entre la baisse journalière du lac (5,5 à 6,5 mm/j d'octobre à février et 7,3 à 7,7 mm/j de mars à mai) et l'évaporation journalière moyenne (6,3 mm/j et 7,7 mm/j pour les mêmes périodes) montre que les pertes par infiltration sont négligeables.

Les points représentatifs des dix années observées ont été reportés sur le graphique 14 (en abscisse la somme des apports du GOULBI de GABI et du GOULBI de MARADI, le solde précipitation-évaporation étant considéré comme négligeable pour la saison des pluies, et en ordonnée le gain en volume à la cote maximale et le gain en volume à la fin de septembre).

La courbe moyenne des gains maximaux en volume croît assez rapidement jusqu'à ce que le total des apports soit de 15 à 16 millions de m^3 (le gain maximal représente alors les $3/4$ des apports) puis sa pente s'atténue assez nettement.

En fin de saison des pluies, dès que le total des apports dépasse 10 millions de m^3 , le gain au 30 septembre ne dépasse pas un palier de 7 millions de m^3 .

En année médiane, le bilan du lac peut s'établir ainsi :

Apports :

GOULBI de GABI	$14 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
GOULBI de MARADI (Canal)	$1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
GOULBI de MARADI (débordements)	$0,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Pluviométrie (550 mm)	$2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

total des apports $17 \text{ millions de } m^3$

Pertes :

Evaporation	6 à 7 millions de m^3
Canal	10 à 11 millions de m^3

Le gain maximal du lac est de 11 millions de m^3 (septembre); les pertes entre le maximum et la fin septembre sont de 4 millions de m^3 .

4. CONCLUSIONS

Les pertes du lac en année médiane sont dues pour 40 % à l'évaporation et pour 60 % au déversement par le canal vers le GOULBI de MARADI. La réduction de l'évaporation est une entreprise difficile et relativement coûteuse, (des essais sont en cours en HAUTE-VOLTA pour réduire l'évaporation sur les retenues de OUAGADOUGOU; le rendement est de l'ordre de 10 à 20 %), qui ne semble pas utilisable pour une retenue hydro-agricole.

Par contre, la construction d'une digue dans la région du canal permettrait de retenir la dizaine de millions de m³ qui se déverse dans le GOULBI de MARADI. En contre-partie, cette digue supprimerait les apports par le canal (qui ne représentent en année médiane, que moins de 10 % des apports du GOULBI de GABI) et les apports par débordement du GOULBI de MARADI (qui ne sont d'ailleurs stockés dans le lac que pour une période assez courte). Il est d'ailleurs possible de capter une partie des hautes eaux du GOULBI de MARADI, en les dérivant vers la retenue du lac par un canal muni de vannes à clapet.

Les données du présent rapport pourraient être utilement précisées par un complément d'information portant sur les points suivants :

Topographie :

- levé de détail du lac de MADAROUNFA et de ses environs (canal);

Climatologie :

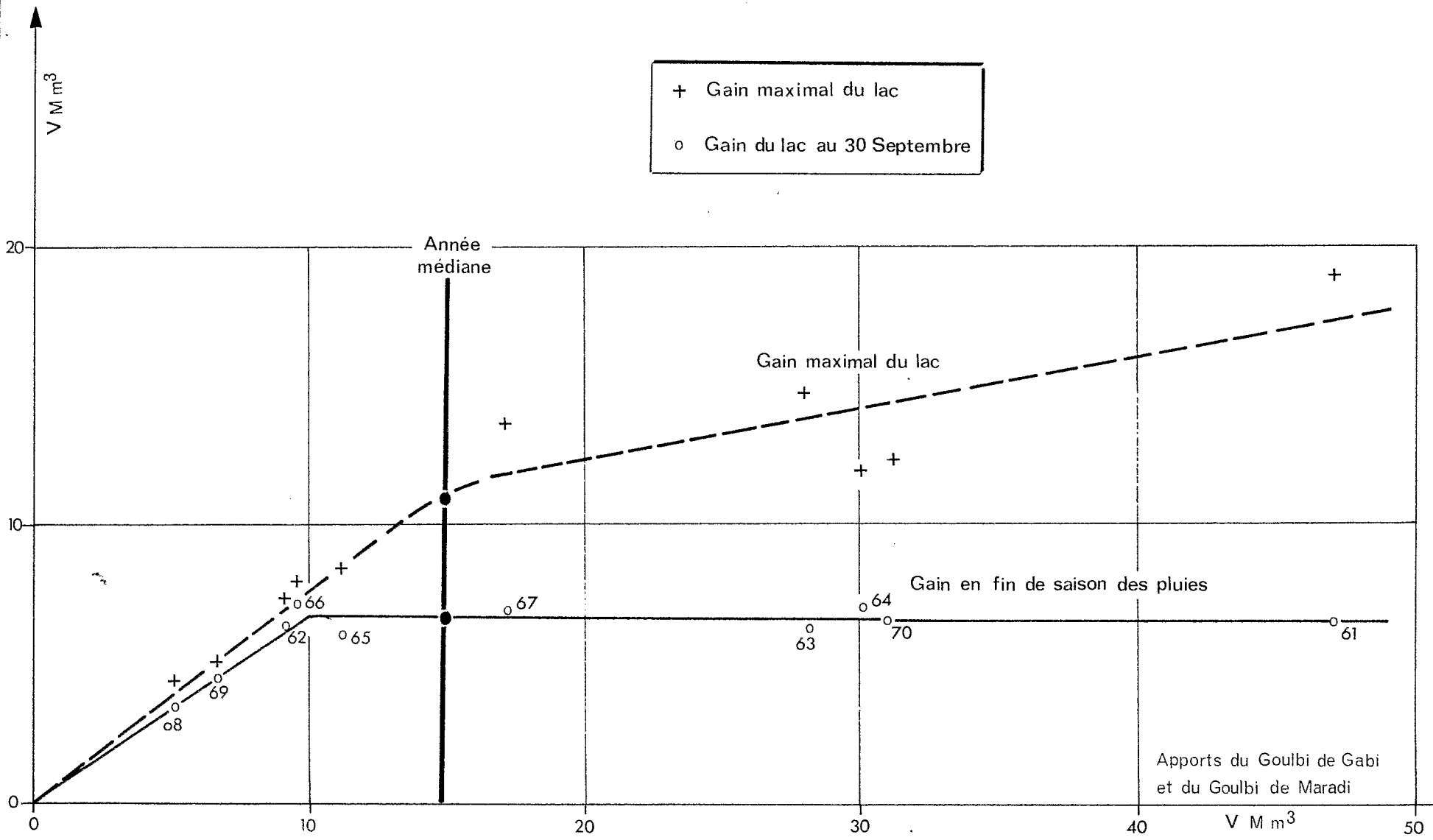
- mise en service d'un ou deux pluviomètres supplémentaires disposés autour du lac;
- mise en service d'un bac d'évaporation flottant sur le lac ou situé à proximité immédiate du lac. Une corrélation avec le bac de l'IRAT (TARNA) permettrait de préciser le coefficient de réduction inter-annuel;
- exploitation des résultats pluviométriques des stations climatologiques de KANO et KATSINA au NIGERIA;

Hydrométrie :

- mesures des débits en hautes eaux à la station de NIELLOUA et à la station de MADAROUNFA sur le GOULBI de MARADI. La mesure des débordements et des apports vers le lac serait très utile;
- mesures des débits (apports et pertes) dans le canal de MADAROUNFA.

Ce programme pourrait être réalisé en une ou deux campagnes de saison des pluies.

Les gains maximaux en volume du lac de MADAROUNFA en fonction des apports



Apports du Goulbi de Gabi et du Goulbi de Maradi