

# MÉMOIRES DE L'INSTITUT SCIENTIFIQUE DE MADAGASCAR

Série D — Tome VI — 1954

## QUELQUES DONNÉES DE BASE EN VUE DE L'ÉTUDE DES RÉGIMES HYDROLOGIQUES DE MADAGASCAR

par

H. PELLERAY \*

GÉNÉRALITÉS . . . . .	43
CHAPITRE I. — Étude des principaux facteurs conditionnels des régimes hydrologiques à Madagascar . . . . .	44
CHAPITRE II. — Débits moyens annuels . . . . .	63
CHAPITRE III. — Débits d'étiage . . . . .	65
CHAPITRE IV. — Débits de crues annuelles . . . . .	69
CHAPITRE V. — Variations annuelles de débits . . . . .	72
CHAPITRE VI. — Crues exceptionnelles . . . . .	77
CHAPITRE VII. — Irrégularité interannuelle . . . . .	82
CHAPITRE VIII. — Coefficient de ruissellement et déficit d'écoulement . . . . .	84

### GÉNÉRALITÉS

Les données hydrologiques sont encore récentes et très incomplètes. Les relevés anciens de hauteurs d'eau et, *a fortiori*, les mesures de débits sont rares et n'ont pu être retrouvés que pour certaines rivières, en particulier pour l'Ikopa, à la traversée de la plaine de Tananarive. Ce sont, généralement, des cotes de hauteurs d'eau que l'on possède.

Même dans ces cas favorables, il subsiste de nombreuses lacunes difficiles à combler (observations interrompues, changement d'échelles, etc...). Cependant, les études entreprises depuis 1948 par la Mission E.D.F., par l'O.R.S.O.M. et par d'autres organismes, permettent de donner un premier aperçu des régimes hydrologiques de la Grande Ile.

Les études se poursuivent sur un nombre croissant de rivières et permettront, au cours des années à venir, de publier des éditions de plus en plus complètes et précises de cette note (1).

\* Ingénieur-Hydrologue de l'Electricité de France, Hydrologue à l'I.R.S.M.

(1) Les renseignements climatologiques mentionnés dans cette note nous ont été aimablement communiqués par M. RAVET, Directeur du Service Météorologique de Madagascar.

## Chapitre I

### ÉTUDE DES PRINCIPAUX FACTEURS CONDITIONNELS DES RÉGIMES HYDROLOGIQUES A MADAGASCAR

Madagascar, d'une superficie égale à celle de la France, de la Belgique et de la Hollande réunies, s'étend sur une longueur de 1.650 km du 12° au 25° de latitude Sud. Sa position insulaire et son relief bien marqué ont pour effet de transformer des conditions climatologiques générales assez simples et de créer une hydrologie complexe. De nombreux climats locaux déterminant des régimes variés, correspondent à des différences d'altitude, de latitude ou d'exposition.

Les autres facteurs conditionnels diversifient encore les régimes hydrologiques ou en créent d'originaux. La constitution géologique des sols, par exemple, apporte des éléments décisifs dans la physionomie d'un régime en faisant varier dans une très large mesure les coefficients d'infiltration et les possibilités de rétention. Ce phénomène est particulièrement important dans le Sud et le Sud-Ouest de l'Ile.

La pluviométrie, facteur conditionnel dominant, présente des variations très importantes d'un point à un autre de l'Ile (fig. 1) qui ne peuvent s'expliquer que par l'étude des autres facteurs : exposition, altitude et latitude en particulier.

Nous étudierons, dans l'ordre, les facteurs suivants :

- A. Pluviométrie.
- B. Température.
- C. Altitude.
- D. Évaporation.
- E. Pente.
- F. Géologie.
- G. Végétation.

#### A. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de la Grande Ile est conditionnée par trois vents principaux :

- 1<sup>o</sup> l'Alizé,
- 2<sup>o</sup> la « Mousson » du Mozambique,
- 3<sup>o</sup> un vent produit par des perturbations de nature tempérée venant des hautes pressions situées sur l'Antarctique et l'Afrique du Sud.

1<sup>o</sup> *L'Alizé.*

Ce vent provient de l'anticyclone presque permanent situé dans le Sud de l'Océan Indien. De direction SE-NO, il souffle toute l'année sur Madagascar, surtout durant l'hiver austral.

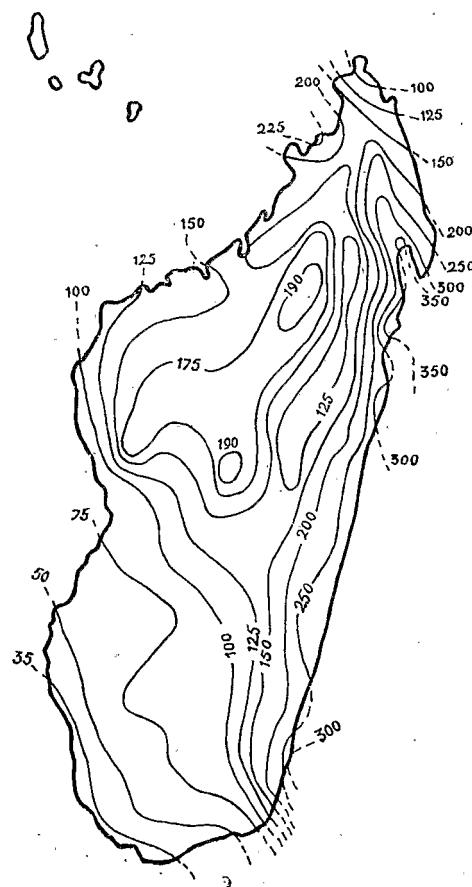


FIG. 1. — Isohyètes annuelles.

L'Alizé heurte la grande falaise de la Côte Est et détermine sur cette région des précipitations annuelles supérieures à 2,50 m (Tamatave : 3.465 mm, Maroantsetra : 3.536 mm).

Des variations locales du relief modifient ces moyennes. C'est ainsi que les rebords des différentes « marches » qui s'étagent de Tamatave à Tananarive, sont plus arrosés que les zones situées entre deux marches consécutives (fig. 2).

Les deux lois de la pluvirosité, lois d'altitude et d'éloignement, jouent peut-être pour accentuer ces anomalies.

L'Alizé déborde largement sur les Hauts-Plateaux (Tananarive : 1.379 mm — Antsirabe : 1.448 mm — Fianarantsoa : 1.245 mm), mais ne traverse l'île entièrement que par intermittence au Nord de Majunga.

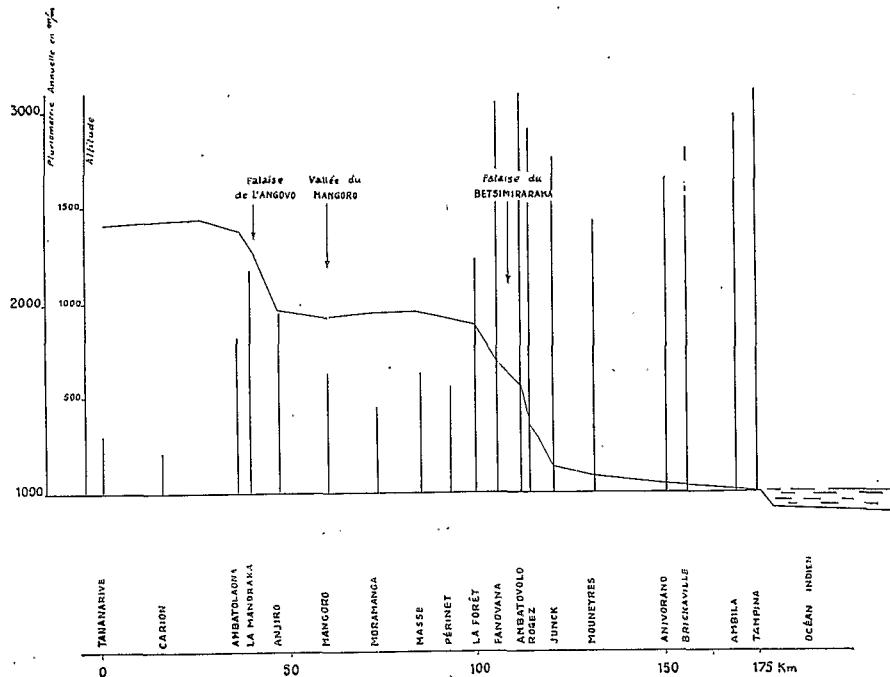


FIG. 2. — Variation de la pluvirosité annuelle moyenne de l'Océan Indien à Tananarive.

En juillet, en particulier, ce vent apporte un genre de « crachin » sur le rebord oriental des Plateaux, puis se dessèche en les franchissant et produit sur la région de Majunga un effet de foëhn qui accentue encore la saison sèche.

Dévié par le relief, l'Alizé développe deux branches, l'une vers le Nord, l'autre vers le Sud. Ces deux courants se séparent au niveau de Manakara, où l'on observe un léger minimum d'intensité sensible uniquement sur la nébulosité. La branche Nord longe la Côte Est en s'affaiblissant, et contourne le Cap d'Ambre (Tamatave : 3.465 mm — Antalaha : 2.196 mm — Vohermar : 1.317 mm). Elle revient arroser la Côte jusqu'au Sambirano et détermine donc un vent de Nord-Est.

L'Alizé ainsi dévié contribue à créer sur la côte Nord-Ouest un climat analogue à celui de la côte Est (Analalava : 1.954 mm — Nossi-Bé : 2.251 mm). Son influence cesse avant Majunga.

La branche Sud part de Manakara (2.908 mm par an) et arrive à Fort-Dauphin bien affaiblie (Farafangana : 2.528 mm — Fort-Dauphin : 1.527 mm). L'Alizé pénètre quelque peu à l'Ouest de Fort-Dauphin pour s'arrêter à 50 km environ suivant une ligne remarquablement visualisée par le changement de végétation; Behara : 537 mm, est déjà en dehors de la zone des alizés.

### 2<sup>o</sup> « Mousson » du Mozambique.

Cette « Mousson du Mozambique », d'après RAVET, est en réalité un alizé d'hémisphère Nord, donc de direction NE-SO, dévié vers les régions équatoriales. Cet alizé attaque la côte Ouest de Madagascar suivant l'axe NO-SO et détermine durant l'été austral des pluies parfois violentes.

Cette mousson ne descend qu'exceptionnellement au niveau de Morondava (725 mm) et intéresse surtout la région située au Nord de Majunga (Majunga : 1.658 mm — Nossi-Bé : 2.251 mm).

Au contact de la mousson du Nord-Ouest et de l'Alizé du Sud-Est, se situe une « zone de convergence intertropicale », dans l'Est de Madagascar, où se forment les perturbations cycloniques. Cette zone correspond à un maximum de précipitations et se déplace au cours de l'année du Nord au Sud de l'Île. Cette zone de convergence, à la hauteur de Diégo-Suarez, en décembre, semble se limiter au Sud au parallèle de Tuléar.

Il est probable que certaines perturbations observées dans les bassins versants du Fiherenana et de l'Onilahy, correspondent à des déplacements de cette zone de convergence.

### 3<sup>o</sup> Perturbations de nature tempérée.

Ces perturbations, venant de l'Afrique du Sud, provoquent en toute saison, et surtout en hiver dans le Sud de l'Île, des précipitations pouvant atteindre 50 mm. Ces précipitations autorisent, pour les rivières du Sud et du Sud-Ouest, des étiages moins sévères qu'on pourrait le craindre, compte tenu de la latitude et de la pluviométrie (Tuléar : 348 mm — Tsihombe : 488 mm).

Ces perturbations ont une répartition très fantaisiste au cours de l'année. Elles se limitent généralement à la latitude de Tuléar, mais peuvent remonter jusqu'à Tananarive et provoquer certaines journées froides.

*Orages et Cyclones.* — Les orages sont très fréquents au cours de la saison des pluies comme dans tous les pays tropicaux. Ces précipitations violentes (forte intensité mais courte durée) sont généralement localisées. Elles peuvent toutefois entraîner des crues notables. Sur les Hauts Plateaux en particulier, les pluies sont en majorité de nature orageuse. Il est donc probable que les petits bassins versants de quelques kilomètres carrés puissent enregistrer des crues très importantes.

Les plus fortes précipitations sont produites par les cyclones (1 m en quelques jours). La côte Est est souvent le théâtre de tels phénomènes.

La côte Ouest et le Sud peuvent aussi être ravagés par des cyclones, comme ce fut le cas de Morombe en mars 1952 et d'Ambovombe en janvier 1951 et mars 1952. Le Service Météorologique poursuit une étude précise de ces perturbations cycloniques et il ressort des graphiques et des cartes établis que la majorité des cyclones se forme au Nord-Est de Madagascar et aborde l'Île entre Tamatave et Vohemar. Ces cyclones ont une trajectoire fréquemment parabolique. Ils pénètrent plus ou moins dans l'Île, sortent fortement affaiblis ou disparaissent après comblement.

Certains cyclones ont pu aborder Madagascar vers Tamatave, ressortir au Nord de Maintirano, changer complètement de direction sur le Mozambique et rentrer dans l'Île plus au Sud.

*Singularités locales.* — Des brises de mer peuvent engendrer en saison sèche d'abondantes précipitations occultes, surtout dans le Sud (Plateau d'Ambovombe).

Sur la côte Nord-Ouest, la valeur élevée des étiages de la région du Sambirano n'a pas la même origine. Si les pluies de saison chaude proviennent de l'Alizé et de la Mousson, les pluies moins abondantes de saison sèche sont dues à des phénomènes de convergence causés par le Massif du Tsaratanana (2.887 m). Ces pluies d'hiver expliquent la richesse relative des étiages du Sambirano comparés à ceux de la basse Betsiboka par exemple.

#### RÉGIMES PLUVIOMÉTRIQUES.

On est ainsi amené à schématiser les principaux régimes pluviométriques comme suit :

##### a) *Côte Est.*

Régime pluviométrique assez homogène du Nord au Sud de l'Île, dominé par les Alizés du Sud-Est. La pluviométrie est abondante et bien répartie sur toute l'année. Total annuel : 3.000 mm environ à Tamatave (fig. 3a). Il n'y a pas, à proprement parler, de saison sèche, mais un ralentissement dans les précipitations en octobre-novembre. La ressemblance avec le climat équatorial d'Afrique Noire est illusoire. La participation au climat tropical de montagne est beaucoup plus nette puisqu'il n'y a qu'un maximum dans l'année, situé au cours de l'été austral de décembre à mars.

##### b) *Sambirano.*

Régime tropical avec prédominance de la Mousson du Mozambique. La pluviométrie annuelle est de 2.000 à 2.500 mm (Ambanja, fig. 3b). Le maximum se situe au début de l'été austral en décembre-janvier et le minimum vers le mois de juillet. L'opposition est très nette entre les saisons sèche et humide. On enregistre pourtant de nombreuses précipitations durant l'hiver austral.

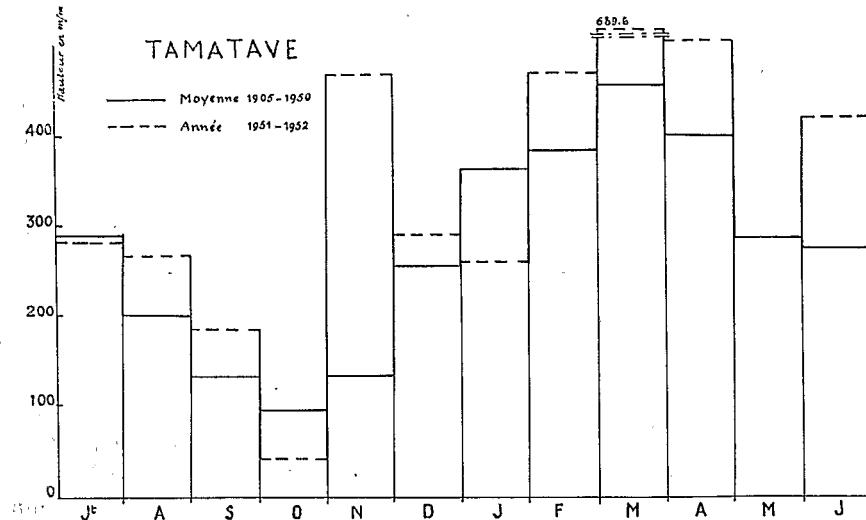


FIG. 3a. — Variation de la pluviométrie annuelle.

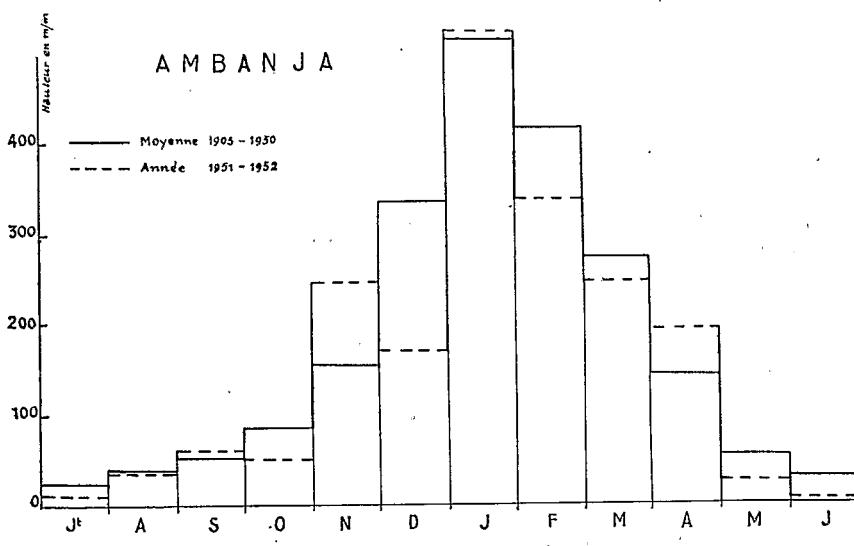


FIG. 3b. — Variation de la pluviométrie annuelle.

c) *Plateaux et région Ouest.*

Régime tropical pur sur la côte Ouest et tempérée par l'altitude sur les Plateaux. L'opposition des saisons est très franche, avec une saison sèche beaucoup mieux marquée que dans le Sambirano, analogue en cela au climat tropical africain. Sur les Plateaux, on compte quelques précipitations en hiver qui atténuent la rigueur de la saison sèche. La répartition des pluies sur la côte Ouest est analogue à celle des Plateaux, avec cependant des moyennes annuelles supérieures.

La pluviométrie décroît de Majunga (1.499 mm, fig. 4a) vers le Sud (Maintirano : 872 mm) et vers l'intérieur du pays. Le maximum se situe en janvier et le minimum en juillet (Tananarive : 1.345 mm, fig. 4b).

d) *Sud-Ouest et Sud.*

Les pluies ont une répartition très fantaisiste mais tombent principalement d'octobre à mai. La considération d'une année moyenne n'a ici qu'une valeur théorique. Le total annuel peut varier de 200 à 800 mm pour une même station pluviométrique, mais il reste toujours faible, surtout en plaine. Le relief peu accentué de cette région succédant aux Hauts-Plateaux engendre un phénomène d'affaissement qui détermine un climat sec et chaud. La saison sèche est *en principe très marquée*. On peut enregistrer des sécheresses totales de plusieurs mois (fig. 5a et 5b, Tuléar-Ambovombe). La hauteur de précipitation annuelle augmente avec l'altitude.

## B. TEMPÉRATURE

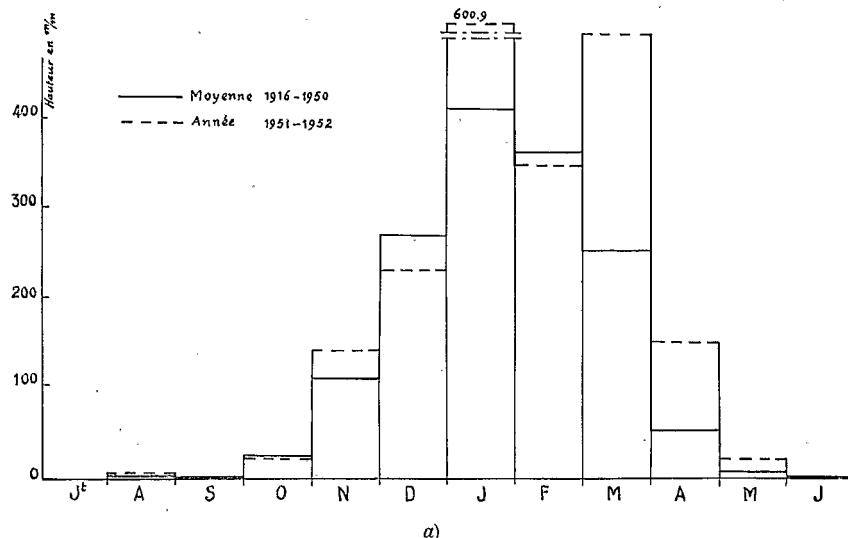
Chaque régime pluviométrique précédemment défini correspond à un graphique de température propre.

La carte des isothermes annuelles (fig. 6) fait ressortir l'influence de l'altitude et de la latitude sur la température moyenne. Les températures maxima sont enregistrées dans les vallées orientées vers l'Ouest et soumises (Maevatanana) à des effets de foëhn en saison sèche.

L'examen de la carte d'amplitude de la variation diurne de la température (fig. 7) souligne la distinction que nous avons faite entre les diverses régions. On constate, comme il est normal, une faible amplitude sur la côte Est et le Sambirano renforçant l'analogie de ces deux climats.

Le Sud-Ouest et le Sud présentent, au contraire, des amplitudes diurnes beaucoup plus grandes. Cette partie du territoire, protégée à l'Est par l'Isalo et les Plateaux et au Sud par le Massif de l'Ivakoany dont les sommets culminent à plus de 1.900 m, est peu soumise aux influences maritimes du Sud ou de l'Ouest. De ce fait, une tendance continentale s'affirme et augmente l'amplitude diurne et la différence des températures entre saison des pluies et saison sèche.

## M A J U N . G A



## TANANARIVE (Observatoire)

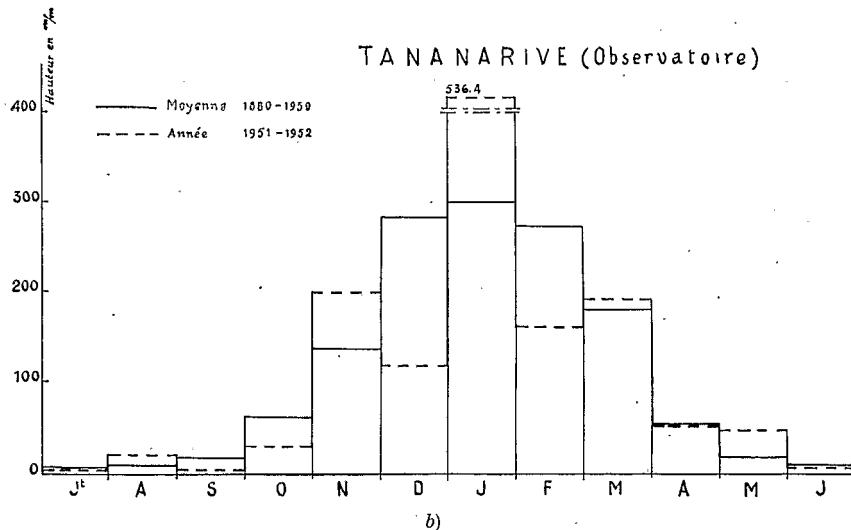


FIG. 4. — Variation de la pluviométrie annuelle.

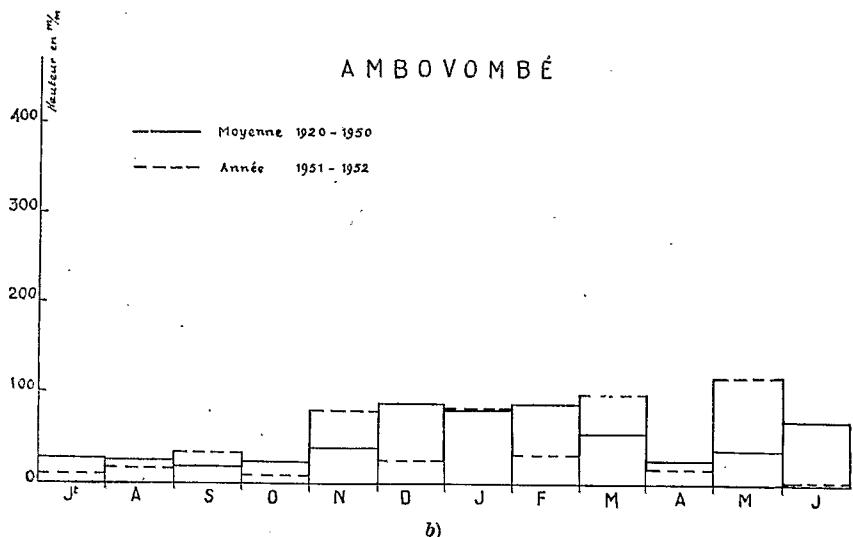
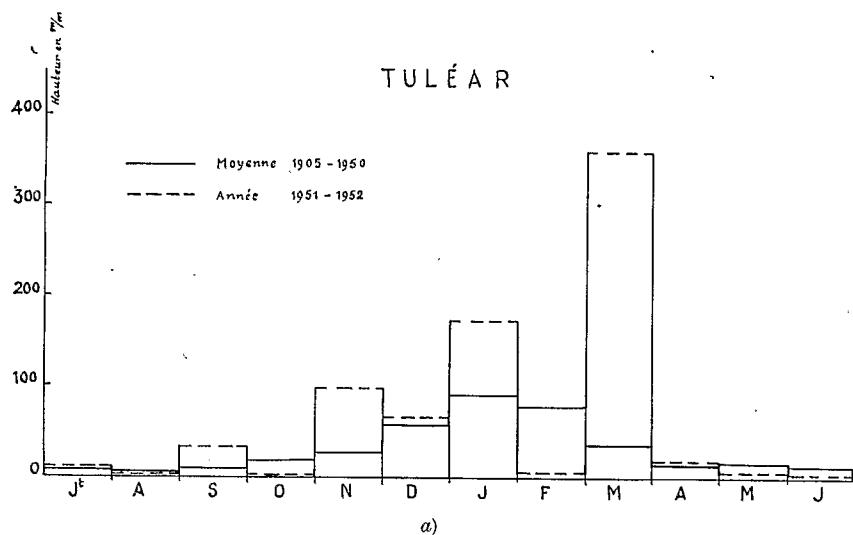


FIG. 5. — Variation de la pluviométrie annuelle.

## C. FACTEUR ALTITUDE

L'altitude joue à Madagascar un rôle prépondérant. La falaise de la côte Est fait un écran efficace pour la partie « sous le vent » (pluviométrie inférieure à 1.500 mm) et un condenseur pour sa face au vent (3.000 mm).

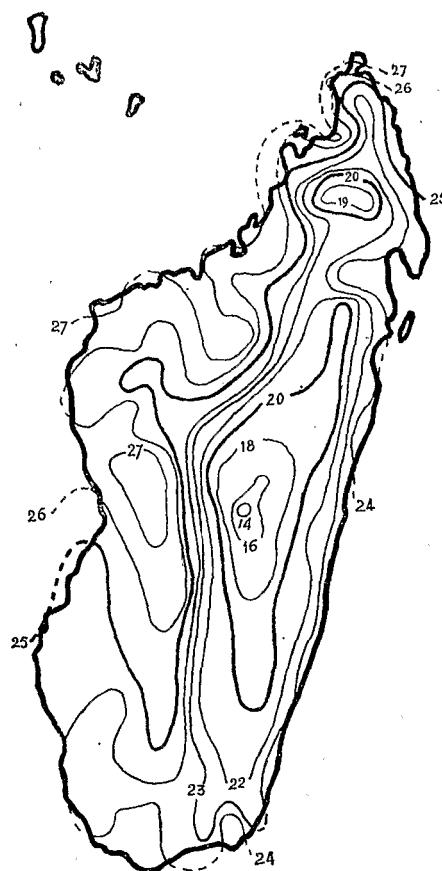
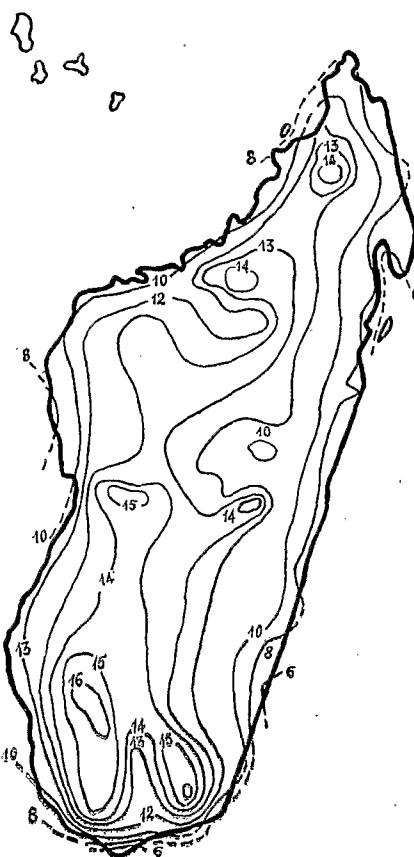


FIG. 6. — Températures moyennes annuelles.

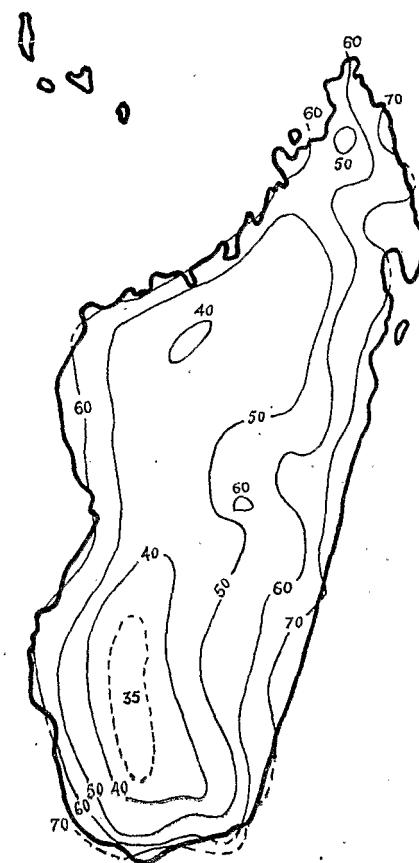
Deux variations en apparence contradictoire, si l'on se réfère uniquement au facteur altitude, ressortent de l'examen des courbes isohyètes. En première approximation, les précipitations au Sud de Majunga décroissent de l'Est vers l'Ouest depuis l'Océan Indien aux Plateaux et croissent de l'Ouest vers l'Est, depuis le canal de Mozambique aux Plateaux. Les lois de la pluviométrie montrent que la pluviométrie croît avec l'altitude et décroît avec

la distance à la mer. Dans le premier cas, l'affaiblissement de l'Alizé avec la distance à la mer est plus important que l'augmentation des précipitations avec l'altitude. Dans le second, les précipitations sur les Plateaux, dues à l'Alizé, décroissent normalement vers l'Ouest sans être renforcées par



poration croît avec la température, donc décroît avec l'altitude, croît avec la hauteur des précipitations et décroît quand l'humidité relative augmente.

La carte de la moyenne annuelle de l'humidité relative met en relief les régions à forte évaporation (fig. 8).



de pluie, une évaporation importante. Le maximum de septembre-octobre est donc moins net. Toutefois, il ressort des quelques mesures effectuées que l'évaporation à Madagascar est en général moins forte que dans les pays tropicaux de même latitude et de même pluviométrie. Cette diminution d'évaporation est principalement due aux températures qui sont, en moyenne, toutes choses égales par ailleurs, plus faibles qu'en Afrique par exemple. Ce phénomène se constate particulièrement sur les Hauts-Plateaux, car la proximité de la mer donne à l'humidité relative des valeurs élevées même en saison sèche où l'on compte plusieurs semaines de crachin.

#### E. FACTEUR PENTE

Les pentes moyennes des rivières malgaches sont souvent fortes. Les sources sont à des altitudes supérieures à 1.000 et 1.500 m et la distance qui les sépare de la mer est rarement supérieure à 500 km. De nombreuses chutes coupent ces rivières. Dans leur cours inférieur les grands fleuves, Betsiboka et Mangoky par exemple, gardent malgré tout des pentes importantes de l'ordre de 0,001 ou de 0,0005.

La pente est parfois plus élevée, en particulier dans le Sud où cette caractéristique intervient de façon décisive dans la progression des crues. Les montées, sur certaines rivières, peuvent être instantanées. Les vitesses sont également très élevées, de l'ordre de 4 à 5 m/sec. Dans certains cas, la forme ramassée des bassins versants et l'exposition favorable aux vents pluvieux viennent renforcer ces phénomènes. Le ruissellement rapide et presque total entraîne des crues brutales et de courte durée.

Sur les rivières des Plateaux, on rencontre, entre les zones de chutes et de rapides, des biefs très calmes aux pentes très faibles. Les crues sont, de ce fait, partiellement amorties. D'autre part, les nombreuses rizières qui tapissent les fonds de vallée ont une influence retardatrice notable. En revanche, ces rizières contribuent à réduire le coefficient de ruissellement en augmentant l'évaporation.

#### F. FACTEUR GÉOLOGIQUE

Le facteur géologique joue un rôle important dans l'établissement d'un bilan hydrologique et dans l'évaluation des débits d'étiage par son influence sur l'infiltration, la rétention et l'évaporation.

Les Hauts-Plateaux, de constitution gneissique, sont recouverts d'une couche d'altération latéritique d'épaisseur variable, nulle sur les sommets.

Les terrains latéritisés présentent une importante capacité de rétention variable avec l'épaisseur d'altération. Les crues des Hauts-Plateaux en sont atténuées et les étiages renforcés. Cette action régulatrice se poursuit dans les grands fleuves de la côte Ouest et Sud-Ouest, dont l'alimentation en saison sèche vient uniquement des Plateaux.

Les sables ont aussi un grand pouvoir de rétention et on a pu constater

l'existence de rivières souterraines alimentées par les nappes ainsi créées. Certaines rivières disparaissent complètement dans les sables et peuvent réapparaître si un obstacle imperméable barre leur cours (Linta).

Les calcaires perméables et les grès absorbent, le plus souvent par infiltration, une partie notable des débits qui les traversent. Le réseau hydrographique de ces régions calcaires est très pauvre (Isalo) ; mais ces terrains permettent des résurgences abondantes en des points localisés (Taheza, Sakamaré).

Les régions cristallines, peu latéritisées, sont au contraire pratiquement imperméables et présentent de faibles capacités de rétention. Les rivières du Sud de Madagascar accusent, de ce fait, des étiages très pauvres. La nature calcaire et les sables de leur cours inférieur aggravent ce résultat.

Les terrains volcaniques ont des propriétés différentes suivant leur constitution. Les basaltes très fissurés de la Montagne d'Ambre sont extrêmement perméables. Ils écrètent la majorité des crues et renforcent notablement les étiages. Les roches volcaniques du Sambirano sont plus altérées et plus imperméables.

#### G. VÉGÉTATION

L'influence de la végétation sur l'évaporation et la rétention n'est pas négligeable. Une épaisse couverture forestière tempère les crues en retenant une grosse quantité d'eau dans l'importante couche d'humus qu'elle crée. Les plantes consomment également une hauteur d'eau appréciable. Les étiages sont, en général, renforcés mais, par contre, le déficit d'écoulement est augmenté.

Ces considérations s'appliquent particulièrement à la côte Est, couverte en général par la forêt que les feux de brousse, allumés par les indigènes, ont partiellement endommagée jusqu'à ces dernières années. Une végétation typique, les « savokas », remplace la forêt et ne tarde pas, par dégradation, à se transformer en prairie.

La carte des forêts de Madagascar de R. MOURANCHE (fig. 9) montre une répartition de la végétation qui se superpose assez bien aux diverses régions que nous avons considérées. Cette carte coïncide également avec celle de l'Indice d'aridité dressée par DUVERGÉ (fig. 10).

Il faut noter que la forêt de la côte Est se différencie nettement de celle de la côte Sud-Ouest. La première est représentée par la forêt tropicale à feuilles persistantes alors que la seconde est pourvue d'une végétation xérophile parsemée d'arbres bouteilles et de baobabs. Cette forêt, très souvent sur sables roux, ne produit presque pas d'humus et ne protège donc pratiquement pas les étiages. Elle consomme probablement beaucoup d'eau en saison des pluies pour alimenter les réserves qui lui permettront de résister aux longs mois de saison sèche.

Les Hauts-Plateaux sont presque entièrement déboisés et recouverts par des graminées de taille moyenne.

Dans le Sud-Ouest et le Sud, indépendamment des lambeaux de forêt xérophile auxquels il a été fait allusion plus haut, on rencontre soit le bush,

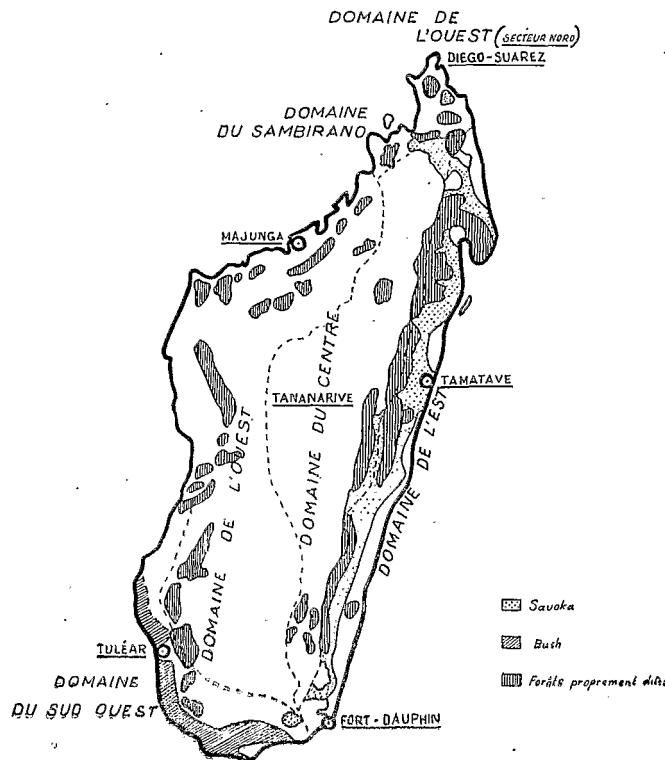


FIG. 9. — Carte des forêts.

végétation buissonnante avec un certain nombre de tamarins, soit la prairie, parsemée de palmiers nains, surtout sur le sable, soit la steppe dans la région d'Ambovombe.

#### RÉGIMES HYDROLOGIQUES.

Les régimes hydrologiques présentent une grande analogie avec les régimes pluviométriques, car l'influence des précipitations est prépondérante. Nous serons cependant amenés à faire des distinctions de détail qui correspondent à l'influence du facteur géologique, en traitant la Montagne d'Ambre

à part, et à l'influence du facteur altitude, en séparant la côte Ouest des « Plateaux ».

Les divers facteurs conditionnels dont nous n'avons cité que les principaux, interviennent pour individualiser les régimes hydrologiques suivants :

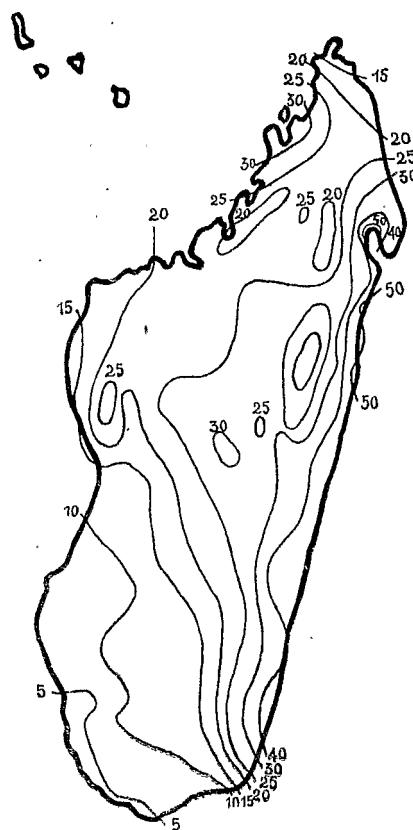


FIG. 10. — Indice d'aridité  $A = \frac{P}{T + 10}$ .

- 1<sup>o</sup> Régime tropical de la côte Est,
- 2<sup>o</sup> Régime tropical du Sambirano,
- 3<sup>o</sup> Régime tropical de la Montagne d'Ambre,
- 4<sup>o</sup> Régime tropical des Hauts-Plateaux,
- 5<sup>o</sup> Régime tropical de la côte Ouest,
- 6<sup>o</sup> Régime subdésertique de transition de la côte Sud-Ouest et du Sud.

*1<sup>o</sup> Régime tropical de la côte Est.*

Les rivières sont abondantes toute l'année et coulent dans des lits bien calibrés coupés de nombreuses chutes. Leur cours ne divague qu'à l'embouchure dans la plaine littorale où des cordons dunaires ont formé des lagunes. Les crues peuvent se produire pendant toute la saison chaude, principalement de janvier à avril. Elles sont très brutales, malgré la forte couverture végétale (précipitations importantes, cyclones, forte pente, bassins versants de moyennes et petites dimensions). Les débits spécifiques ont des valeurs élevées.

Les pluies de « saison sèche » donnent normalement aux débits d'étiage des valeurs importantes encore soutenues par la restitution des nappes. Le minimum a lieu généralement aux mois de septembre-octobre, encore est-il assez peu marqué. La décroissance des débits étant très irrégulière, la courbe de tarissement n'existe pratiquement pas.

Cette région est couverte de forêts épaisses. Dans les régions déboisées et la plaine littorale, on cultive avec succès : canne à sucre, café, vanille, poivre et cacao.

*2<sup>o</sup> Régime tropical du Sambirano.*

Les rivières du Sambirano sont abondantes et leurs crues en décembre et janvier roulent des débits spécifiques élevés.

Les étiages sont soutenus, comme pour la côte Est, par des précipitations de saison sèche et des réserves hydriques importantes. La courbe de tarissement est assez difficile à déduire de la courbe réelle, car la saison sèche présente rarement quelques semaines consécutives sans pluie.

La couverture végétale est également très épaisse mais trouée par endroits de nombreuses « savokas » et prairies. Le sol volcanique, extrêmement fertile, du cours inférieur des rivières du Sambirano porte des cultures tropicales diverses : palmiers, cocotiers, canne à sucre, cacao, café, etc...

*3<sup>o</sup> Régime tropical de la Montagne d'Ambre.*

Le facteur géologique différencie nettement cette région de ses voisines. Le relief, très accentué, interdit actuellement l'établissement d'une moyenne annuelle pluviométrique exacte, qui est voisine sans doute de 2.000 mm. Les pluies de saison humide sont importantes, mais absorbées en très grande partie par les basaltes fissurés.

De ce véritable château d'eau qu'est la Montagne d'Ambre s'échappent de nombreuses petites rivières qui comptent parmi les plus régulières de l'Ile. Le débit de base augmente notablement en saison chaude, mais il faut de très grosses précipitations pour enregistrer une montée brutale du plan d'eau, malgré l'exiguité des bassins versants d'une centaine de km<sup>2</sup> au maximum.

L'importante capacité de rétention des basaltes permet des étiages abondants malgré une saison sèche plus marquée que dans les deux régimes précédents. La forêt primaire qui couvre partiellement la Montagne d'Ambre

protège ces débits. Il est probable que, comme à la Réunion, une certaine quantité d'eau soit perdue pour les rivières de la Montagne d'Ambre et alimente des sources ou même retourne à la mer. L'imprécision sur la pluviométrie est trop grande dans cette région pour que l'on ait quelques chances de faire une évaluation des pertes, même approchée.

#### 4<sup>o</sup> *Régime des Hauts-Plateaux.*

Les rivières des Plateaux ont des modules élevés et leurs hautes eaux se situent en janvier-février. Les débits spécifiques sont plus faibles que sur la côte Est. Seules les crues exceptionnelles généralement dues à des cyclones, peuvent présenter des débits unitaires très importants, mais nettement plus faibles cependant que la côte Est (relief plus faible, influence des cyclones moins directe). Les montées du plan d'eau sont lentes, malgré les fortes pentes, car de nombreux lacs et de larges vallées alluviales écrètent de façon sensible les pointes de crues. Les étiages succédant à un tarissement assez régulier sont moins riches que ceux de la côte Est, mais fournissent des débits encore notables malgré l'absence presque totale des pluies. Comme nous l'avons vu, les Plateaux, généralement latéritisés, présentent une certaine capacité de rétention, une évaporation faible en saison sèche et l'humidité relative y est élevée grâce à la proximité de la mer. Par contre, les très grandes superficies couvertes par les rizières aident à accroître l'évaporation par leurs besoins d'irrigation en fin de saison sèche.

Cette région centrale constitue la partie supérieure des bassins versants des grands fleuves malgaches et nous retrouverons dans l'étude de ces fleuves, l'influence du régime des Hauts-Plateaux, même si une partie importante du bassin participe à un régime très différent (cas du Mangoky).

#### 5<sup>o</sup> *Régime de la côte Ouest.*

Ce régime, représenté par les rivières au Sud de Majunga et la région de Majunga elle-même, est très voisin de celui des Plateaux, mais le facteur altitude n'intervient plus.

Les crues sont très brutales et présentent des montées assez rapides sur les petits bassins versants. Sur les grands bassins versants, l'effet modérateur des Hauts-Plateaux, la pente générale faible et les dimensions même du bassin versant atténuent les pointes de crues mais étalement les forts débits et prolongent les périodes d'inondation.

Les basses vallées de ces grands fleuves portent sur des alluvions renouvelées chaque année des plantations de tabac et de riz d'excellente qualité.

Durant la saison sèche très marquée, la température moyenne est encore élevée et l'humidité relative très faible. Les débits d'étiage sont maigres et succèdent à une courbe de tarissement assez nette. Les débits décroissent généralement vers l'aval, leur alimentation provenant principalement des Hauts-Plateaux. Cet aréisme saisonnier s'observe surtout au Sud de la Tsiribihina.

Parmi les divers régimes de l'Ile, c'est celui qui s'apparente le plus au

régime tropical africain (les variations de la pluviométrie sont d'ailleurs très voisines).

*6<sup>o</sup> Régime du Sud-Ouest et du Sud.*

Nous appellerons ce régime très particulier « régime subdésertique de transition ».

Les crues, extrêmement brutales ne durent parfois que quelques heures et peuvent, dans certains cas, submerger un lit complètement à sec. Les débits spécifiques de crues sont élevés, la topographie des bassins se prêtant à des perturbations de grande envergure. Les cyclones peuvent engendrer des débits énormes que rien n'arrêtera. Le ruissellement est presque instantané et total sur la partie supérieure cristalline des bassins versants de forme souvent ramassée dont la pente est extrêmement forte et la couverture végétale très clairsemée. Ces crues se produisent en général durant l'été austral, mais en juillet 1939, la Mananara aurait coté 4 m conséutivement à un gros orage. Les pluies à contre saison sont catastrophiques et conduisent à la disette en détruisant les plantations indigènes dans le lit des rivières.

A ces crues succède un tarissement rapide conduisant souvent à un débit apparent d'étiage nul. La saison sèche est extrêmement marquée et d'autant plus rigoureuse qu'on s'approche de la mer. La nature perméable du cours inférieur de ces rivières (sables roux et calcaires) accentue encore ce phénomène et rend la ressemblance avec les « ouadi » d'Afrique du Nord plus frappante. Il subsiste un sous-écoulement permanent dans les sables formant le lit de toutes ces rivières où les indigènes creusent des trous et trouvent rarement l'eau à plus de 1,50 m à 2 m de profondeur.

Le réseau hydrographique très peu développé souligne l'aréisme de cette région formant un contraste frappant avec la zone des Hauts-Plateaux où le réseau hydrographique est très dense. L'exemple le plus frappant est donné par la région comprise entre la Linta et l'Onilahy. Cette région n'est drainée par aucun fleuve, les eaux de ruissellement se perdant dans les sables. Cette zone correspond à une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 350 mm. De nombreuses résurgences dans les calcaires, au pied de l'Isalo en particulier, viennent parfois masquer la tendance subdésertique de ce climat.

*7<sup>o</sup> Régimes mixtes.*

C'est le cas le plus fréquent et, en particulier, celui des grands fleuves malgaches. Il est difficile de faire la part de chaque régime élémentaire, mais l'influence de chacun d'eux sur les étiages ou les crues est extrêmement nette.

Exemple :

**MANGOKY à VONDROVE** : Hauts-Plateaux + Sud-Ouest par ses affluents du Sud et de l'Ouest.

**ONILAHY à TONGOBORY** : Hauts-Plateaux + Sud-Ouest et Sud, mais étiages soutenus par les très fortes résurgences dans les calcaires de l'Isalo.

MANDRARE à AMBOASARY: Sud + côte Est par certaines branches supérieures des affluents de rive gauche.

BETSIBOKA : Hauts-Plateaux + côte Ouest.

MANDRAKA : Bien que très petite, Hauts-Plateaux + côte Est.

MANANARA : Sud + côte Est.

## Chapitre II

### DÉBITS MOYENS ANNUELS

Ce chapitre, comme les suivants, ne présentera pas un caractère d'exactitude poussé. Les résultats acquis ne sont relatifs qu'à deux années d'observations dans la majorité des cas.

La notion de débit moyen ne présente pas ici le même intérêt pratique que dans les régions plus tempérées, les écarts par rapport à ce débit étant relativement importants. Les valeurs des coefficients mensuels de débit peuvent varier de 0 à 10 et peut-être plus, alors que sous des latitudes plus fortes, ces variations se réduisent à quelques unités. Les chiffres obtenus sont cependant assez représentatifs d'un régime par la fraction du volume précipité qu'ils expriment et l'influence de certains facteurs conditionnels qu'ils font ressortir lorsqu'intervient le calcul du déficit d'écoulement (Tableau I).

TABLEAU I

#### MODULES

	<i>B, V.</i> <i>km<sup>2</sup></i>	<i>Pluviométrie</i> <i>annuelle</i> <i>mm.</i>	<i>Module</i> <i>m<sup>3</sup>/sec.</i>	<i>Module</i> <i>spécif.</i> <i>1/s/km<sup>2</sup></i>	<i>Régime</i>
Onibe .....	1.300	1.600	31	24,0	Côte Est
Vohitra .....	1.950	2.150	94	48,0	
Mandraka .....	57	2.208	2.400	42,1	Mixtes
Sakaramy-Be .....	18,2	2.500	0,336	18,5	Montagne d'Ambre
Besokatra .....		2.500	1,11		
Varahina-Sud.....	283	1.552	8,3	29,3	Hauts-Plateaux
Manandriana .....	57	1.700	1,38	24,2	
Ikopa .....	4.190	1.343	72	17,2	
Sahabe (Alaoatra) .....	992	1.220	14,5	14,6	
Menarandra .....	5.520	695	13,8	2,4	Sud-Ouest et Sud
Mangoky .....	51.625	1.050	403,6	7,8	
Onilahy .....	29.100	863	146,0	5,0	
Mandrare .....	12.650	771	81,8	6,46	
Mananara .....	1.132	882	6,81	6,02	

Sur la côte Est, on relève des débits spécifiques de 20 à 50 l/sec/km<sup>2</sup> pour des pluviométries de 1.600 à plus de 2.000 mm. Ces débits élevés résultent de conditions favorables. Les fortes précipitations ne sont que partiellement attaquées par l'évaporation, l'humidité relative de l'air étant toujours très élevée (moyenne 78 % à Tamatave) et la température moyenne relativement faible. La moyenne de Tamatave, 24°, représente un maximum, les bassins versants étudiés ont tous des altitudes moyennes assez élevées.

En plus de la faible valeur de l'évaporation, d'autres facteurs interviennent pour conserver au module une valeur élevée. Les fortes pentes, en entraînant un ruissellement rapide, évitent la formation de lacs, de marais ou de vastes champs d'inondation sur lesquels l'évaporation exercerait une activité intense. La forêt de la côte Est, par sa forte densité, entretient l'ombre, la fraîcheur et l'humidité au niveau du sol ; les eaux de surface et de faible profondeur sont ainsi protégées, ce qui explique les étiages élevés. Mais en hautes eaux, elle consomme elle-même une quantité d'eau importante qu'il est impossible de chiffrer jusqu'ici, compensant largement, sur le bilan annuel, les gains des débits d'étiage. On peut avoir une idée de cette consommation en considérant le débit spécifique de l'Onibe à végétation essentiellement forestière.

La Montagne d'Ambre est un exemple de régime tropical altéré. Le facteur géologique donne à l'infiltration une valeur élevée, de l'ordre de 8 à 900 mm. Le module du Sakaramy-Bé semble assez faible pour une pluviométrie de 2.500 mm. Si dans le bilan hydrologique les pertes étaient seulement dues à l'évaporation, le module serait multiplié par 2,5 ou 3 et aurait une valeur compatible avec les autres facteurs conditionnels (pluviométrie, température, altitude).

Sur les Plateaux, les études peu nombreuses que nous possédons ont l'avantage d'intéresser des périodes plus longues. Les débits spécifiques sont de l'ordre de 15 à 30 l/sec/km<sup>2</sup> pour une pluviométrie de 1.500 mm.

La température moyenne assez faible (Tananarive : T. moy. = 18°) permet ces modules élevés, d'autant plus que la couverture végétale peu importante provoque peu de pertes. La Varahina-Sud présente un module plus élevé que celui de l'Ikopa à Bevomanga. L'altitude moyenne du bassin versant est plus forte, la température moyenne est plus faible et les précipitations plus importantes.

Dans la « Monographie du bassin supérieur de l'Ikopa », CAMUS note que les irrigations dans la plaine de Tananarive absorbent environ  $150 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  par an. Les chiffres que nous indiquons tiennent compte de ce débit dérivé.

Pour le Sud et le Sud-Ouest, les résultats ne s'étendent que sur une année d'observations et peuvent donc présenter des valeurs différentes des valeurs moyennes. L'erreur est probablement par excès.

L'exemple du Menarandra est tout de même éloquent avec 2,4 l/sec/km<sup>2</sup> pour une pluviométrie moyenne de 695 mm en 1951-1952. Beaucoup de facteurs concourent à accroître l'évaporation : sol imperméable dans la

partie amont du bassin versant, sables dans la partie inférieure, température moyenne élevée 23° à 26°, humidité relative faible 40 à 50 %. Les chiffres énoncés coïncident avec les résultats trouvés en Afrique (Mayo-Binder : 6,5 l/sec/km<sup>2</sup> pour une pluviométrie de 860 mm et régime dahoméen : Mono).

Les régimes mixtes assurent la transition entre les divers régimes types précédemment cités.

Le Mandrare présente un module spécifique supérieur à celui de l'Onilahy malgré une pluviométrie nettement plus faible. La forme allongée du bassin versant de l'Onilahy lui donne une pente moyenne plus faible que celle du Mandrare dont la forme ramassée favorise un écoulement rapide, relativement moins attaqué par l'évaporation. Les fréquentes variations du lit du Mandrare au cours des crues ont pu également introduire des erreurs dans le calcul du module.

Il est à noter que pour tous ces fleuves à régime mixte, avec prédominance de régime Sud ou Sud-Ouest, les modules sont très homogènes et correspondent bien à des valeurs intermédiaires entre cours d'eau du Sud, 2 à 3 l/sec/km<sup>2</sup> et Hauts-Plateaux ou Sud-Est, 12 à 20 l/sec/km<sup>2</sup>.

### Chapitre III

#### DÉBITS D'ÉTIAGE

Les régimes hydrologiques de Madagascar s'individualisent plus nettement par leurs débits d'étiage que par leurs autres caractéristiques (Tableau II).

La carence des précipitations, déterminant les étiages, varie suivant les régimes pluviométriques. Peu marquée sur la côte Est, la saison sèche s'affirme nettement dans les autres régions de l'Île, tolérant toutefois des pluies assez abondantes sur la Montagne d'Ambre, le Sambirano et même les Plateaux. L'Ouest et le Sud subissent au contraire des semaines et parfois des mois consécutifs de sécheresse.

Les débits spécifiques d'étiage sont surtout affectés par la répartition des pluies au cours de l'année et par la date de la fin de la saison des pluies dans les régions à saison sèche rigoureuse. C'est cette date qui commande l'origine de la courbe de tarissement.

Le régime de la côte Est, régime tropical de montagne, présente des étiages extrêmement riches, variant de 10 à 20 l/sec/km<sup>2</sup>, vraisemblablement supérieurs à ceux du Sambirano. On est loin du régime tropical pur aux étiages très sévères. Les débits de basses eaux de la côte Ouest doivent s'en rapprocher davantage et être de l'ordre de 1 l/sec/km<sup>2</sup>.

Sur les Hauts-Plateaux, l'humidité relative élevée, quelques pluies de saison sèche et les réserves constituées dans les zones d'altération latéritique, permettent des étiages riches variant de 5 à 15 l/sec/km<sup>2</sup>. La valeur de 4,9 l/sec/km<sup>2</sup> que l'on relève pour l'Ikopa à Bevomanga ne tient pas compte du débit dérivé pour l'irrigation et le débit spécifique doit être ainsi ramené à 7 ou 8 l/sec/km<sup>2</sup>.

TABLEAU II  
ÉTIAGES CARACTÉRISTIQUES

	B. V. km <sup>2</sup>	Pluviométrie annuelle mm.	Débit d'étiage m <sup>3</sup> /sec.	Débit spécif. d'étiage 1/sec/km <sup>2</sup>	Régime
Rianila .....	5.900	2.300	71	12	*Trop. de côte Est
Vohitra .....	1.950	2.150	35	18	
Onibe .....	1.800	1.600	11	8,5	
Namorona .....	325		2,5	7,7	
Mandraka .....	57	2.208	0,810	14,2	*Côte E. + Plateaux
Mangoky .....	51.625	1.050	71	1,37	*Plateaux + S. O.
Onilahy .....	29.100	863	23,0	0,8	*Plateaux + S. O.
Mananara .....	1.132	882	0,590	0,52	*Sud + Côte Est
Sakaramy-Be .....	18,2	2.500	0,094	5,2	Trop. de la Montagne d'Ambre
Varahina-Sud .....	283	1.552	3,31	11,7	Hauts-Plateaux
Manandriana .....	57	1.800	0,410	8	*
Ikopa à Bevomanga .....	4.190	1.343	12,7	3	
Sahabe .....	992	1.220	3,8	3,84	
Ikopa à Antsatrana .....	18.500	1.274	85	3,5	Plateaux + Côte O.
Manananantamana .....	6.850	1.100	17,8	2,8	*Plateaux + Ouest
Zomandao .....	583	1.000	0,99	1,7	*Plateaux + S. O.
Ihosy .....	1.590	1.000	4,80	2,7	*Plateaux + S. O.
Fiherenana Supérieur ..	503	1.050	0,78	1,5	*Sud + Sud-Ouest
Ranomena .....	245	1.000	0,900	3,7	*(Résurgences)
Fiherenana .....	3.820	1.000	4,85	1,2	*
Menarandra					
Tranoroa .....	5.520	695	0,244	0,044	*
Lovokarivo .....	6.820	650	0,255	0,037	*
Linta .....	1.490	680	0,00	0,00	*(Sous-écoulement permanent)
Mandrare .....	12.650	771	0,835	0,07	*
Taheza .....	1.470	900	7,0	5,1	(Résurgences)
Sakamare .....	1.010	875	8,0	7,9	

\*Rivières pour lesquelles nous n'avons que deux années d'observations.

Les rivières du Sud-Ouest et du Sud ont des basses eaux très pauvres. En plus d'une évaporation active et d'une pluviométrie très faible, la constitution géologique des sols empêche toute réserve hydrique par son imperméabilité dans les parties les plus arrosées.

Les chiffres cités ne sont basés que sur deux années d'observations et la comparaison des résultats montre la grande irrégularité des débits dans ces régions. La répartition des précipitations au cours de l'année a une importance capitale pour les étiages de ces rivières où le ruissellement est extrêmement rapide.

On constate sur ces cours d'eau une tendance très nette à l'aréisme. Les petits bassins versants supérieurs présentent des débits notables qui s'amer- nuisent jusqu'à disparaître dans le lit principal. Les parties supérieures des bassins versants sont arrosées par des pluies de relief, en général plus abondantes que sur l'ensemble du bassin versant et les précipitations occultes y sont aussi plus fortes. Mais la constitution géologique des parties inférieures joue un rôle important en favorisant les infiltrations dans les basses plaines alluviales, les bancs calcaires ou les sables. Les cultures prélèvent également des débits non négligeables, en particulier durant les mois les plus pauvres.

Le Fiherenana qui, dans sa partie supérieure, présente des débits relativement élevés (Ranomena : 3,7 l/sec/km<sup>2</sup>), provenant de résurgences dans les grès de l'Isalo, ne roule plus que 1 l/sec/km<sup>2</sup> 60 km en aval. Le débit diminue ensuite très vite et disparaît entièrement 30 km plus bas, en aval des chutes. Un sous-écoulement subsiste dans les sables. Le Fiherenana n'arrive à la mer qu'à l'occasion des grandes crues et durant quelques heures seulement.

A la station de jaugeage de Bevia, la Mananara débite encore 0,52 l/sec/km<sup>2</sup>. Le bed-rock très proche empêche un sous-écoulement important, mais à 25 km en aval, la Mananara est complètement absorbée par les sables (Une bonne partie de son débit est déviée pour l'irrigation).

Le Menarandra et la Linta présentent le même phénomène. A la station d'Ejeda, la Linta franchit un seuil rocheux. Le débit apparent, nul 100 m en amont, est d'environ 1 l/sec/km<sup>2</sup>. Le seuil rocheux est probablement très fissuré et permet à une grosse partie du débit total de la Linta de gagner l'aval par infiltration. A Vohitany, 45 km en amont, la Linta roule encore quelques dizaines de l/sec qui sont ensuite absorbés par les sables. Ce sous-écoulement joue le rôle d'une protection naturelle contre une évaporation intense qui ne permettrait pas aux indigènes de s'approvisionner en eau pour eux et leur important bétail dans les puits qu'ils creusent dans le sable.

Dans le régime subdésertique de transition, Sud et Sud-Ouest, nous citons la Taheza et la Ranomena. Nous mentionnons ces deux rivières à titre indicatif pour montrer l'influence des résurgences aux pieds de l'Isalo.

Le débit minimum d'étiage de la Taheza est d'environ 7 m<sup>3</sup>/sec. La Sakamare, affluent de l'Onilahy issu de l'Isalo, comme la Taheza, présente un débit d'étiage un peu supérieur, d'environ 8 m<sup>3</sup>/sec. Ce sont les deux seules rivières importantes à étiages riches dans cette région. Le long de l'Onilahy, comme sur les bords du Mangoky, on rencontre de nombreuses sources au bas des collines calcaires. Sur le Mangoky, les sources sont souvent sulfureuses et chaudes.

Le débit d'étiage de l'Onilahy est fonction de nombreuses résurgences qui sourdent aux pieds de l'Isalo. Les affluents du Nord sont pérennes et présentent comme la Taheza et la Sakamare des débits élevés. Les affluents du Sud, comme la Sakamena, sont au contraire à sec durant de longues périodes.

Les fleuves à régime mixte ont des étiages spécifiques variables suivant les proportions des régimes élémentaires qui les composent. La partie supérieure du Mangoky est drainée principalement par la Matsiatra. La Mananantenana et le Zomandao n'apportent que de faibles débits.

Nous avons reporté dans le tableau suivant les superficies des trois bassins versants des principaux affluents du Mangoky, le pourcentage que représente le bassin versant de chaque affluent dans la surface totale, les débits voisins de l'étiage qui ont été mesurés et leur pourcentage par rapport au débit du Mangoky à Vondrove au même moment :

	Surface du B. V. km <sup>2</sup>	Surface relative %	Débit m <sup>3</sup> /sec.	Débit Q Q à Vondrove %	Débit spécif. 1/s/km <sup>2</sup>	Pluviom. moyenne mm.
Matsiatra .....	11.100	21,4	55	60	5	1.250
Mananantenana ....	6.350	12,3	17,6	20	2,8	1.050
Zomandao + Ihosy .	2.178	4,2	4,78	5,5	2,5	1.000
Mangoky .....	51.625	100	87,5	100	1,7	1.050

Ce tableau nous montre qu'à 200 km de la station principale les 38 % du bassin versant total fournissent 86 % du débit que l'on mesurera à Vondrove. L'étiage est donc assuré par les Hauts-Plateaux.

On constate effectivement que les affluents inférieurs comme la Malio et la Sakamavaka ont des débits nuls ou très faibles. Le débit brut d'étiage, comme le débit spécifique décroît vers la mer. Le fleuve s'élargit, divague dans un immense lit de sable et forme un delta démesuré où de nombreux bras serpentent, offrant à l'évaporation, extrêmement active, une lame d'eau très mince.

Pour les grands fleuves, Ikopa et Betsiboka, les résultats sont très différents. Contrairement au Mangoky, la pluviométrie croît lorsqu'on s'approche de la mer et l'alimentation du bassin versant, beaucoup plus homogène, donne au débit d'étiage une valeur élevée de 3,5 l/sec/km<sup>2</sup>. L'altitude moyenne du bassin versant à la station de jaugeage d'Antsatrana est d'environ 1.000 m. Elle réduit une évaporation qui devient de plus en plus active vers l'Ouest en saison sèche et protège ainsi les réserves hydriques importantes qui se sont constituées dans les épaisses couches latéritiques des Plateaux.

Les chiffres que nous citons, relatifs à l'année 1952, n'ont évidemment aucune valeur statistique, mais semblent, après des enquêtes menées sur place se rapprocher des valeurs moyennes.

L'étiage de 1951 a été dans le Sud de Madagascar extrêmement riche ; comme on pourra en juger par le tableau suivant :

	<i>Étiage 1951</i>	<i>Étiage 1952</i>
Onilahy .....	1,27 1/sec/km <sup>2</sup>	0,8 1/sec/km <sup>2</sup>
Menarandra.....	0,196 "	0,04 "
Mandrare .....	0,4 "	0,07 "
Mananara .....	1,87 "	0,52 "

Lors de saisons sèches prolongées, comme celle de 1937, le Menarandra et le Mandrare ont des débits apparents sensiblement nuls.

Si l'on compare les étiages spécifiques des rivières malgaches et ceux des cours d'eau d'Afrique qui présentent des caractéristiques analogues, on constate pour la Grande Ile, des valeurs beaucoup plus élevées pour des pluviosités souvent inférieures.

Nous voyons à ce fait deux raisons principales :

1<sup>o</sup> Sauf parfois dans le Sud, la saison sèche n'est jamais rigoureuse et il tombe toujours quelques millimètres de pluie, évitant des étiages catastrophiques. Dans le Sud, les précipitations occultes en saison sèche sont, dans certaines régions (Ambovombe) tellement abondantes qu'on a songé à les utiliser.

2<sup>o</sup> Les températures moyennes sont, en général, plus faibles qu'en Afrique à latitude égale. L'influence modératrice de l'altitude et de la mer, permettent des moyennes plus clémentes. L'évaporation directement fonction de la température est donc réduite dans les mêmes proportions. L'humidité relative est également plus élevée en particulier sur les Plateaux.

## Chapitre IV

### DÉBITS DE CRUES ANNUELLES

Dans les pays tropicaux, les crues sont des phénomènes généralement réguliers, revenant chaque année à la même époque et qui s'écartent peu de leur valeur moyenne, du moins pour les grands fleuves connus.

Les causes qui donnent naissance à ces crues sont presque toujours de même nature et décalées parfois dans le temps et dans l'espace, elles déterminent des montées semblables. Il ne paraît pas que l'on puisse rencontrer la complexité des averses qui, en France, sont à la base des crues importantes de nos fleuves.

A Madagascar, le relief et la position insulaire altèrent, comme nous l'avons vu, les caractéristiques climatiques générales des pays tropicaux. La période de hautes eaux est la même pour toute l'Ile et se situe de décembre à mars. La plus grande irrégularité, tant pour la date des crues que pour les débits, affecte les rivières du Sud et du Sud-Ouest. Les dimensions, les

caractères géologiques et l'alimentation des bassins versants modifient les graphiques des crues dont les pointes se superposent à un débit de base plus ou moins important (Tableau III).

Deux bassins versants, identiques par ailleurs et présentant des surfaces très différentes, auront des graphiques de crues sans analogie apparente. Pour le plus grand, la montée des eaux, en régime pluvial tropical, sera lente, continue, puis étale durant plusieurs semaines. Pour le petit bassin versant, chaque averse importante déterminera une crue, qui, sur le graphique, inscrira une pointe aiguë, le débit revenant rapidement à une valeur proche de celle qu'il avait au départ.

TABLEAU III

## CRUES ANNUELLES

B. V. km <sup>2</sup>	Débit de crue m <sup>3</sup> /sec.	Débit spécifique 1/sec.	Régime
Vohitra .....	1.950	500	250
Mandraka .....	53	18	340
Namorona .....	325	67	206
Sakaramy-Be .....	18,2	5,0	275
Varahina-Sud .....	283	43	152
Manandriana .....	57	10	175
Ikopa .....	4.190	275	66
Ikopa à Antsistrana .....	18.500	1.850	100
Menarandra à Tranoroa ..	5.520	800	145
Mangoky .....	51.625	3.000	58 (1)
Onilahy .....	29.100	990	34 (2)
Mandrare .....	12.650	2.770	220
Mananara .....	1.132	390	345

(1) Influence de la grande superficie du bassin versant.

(2) Influence de la faible pente.

A Madagascar, par contre, la distinction entre grand et petit bassin versant ne s'impose pas avec la même netteté et seule, la Betsiboka, après son confluent avec l'Ikopa, draîne une surface assez grande pour présenter en hautes eaux des débits soutenus (les crues élémentaires n'étant plus individualisées). Dans ce cas particulier, la faible pente du cours inférieur favorise l'étalement des crues déjà provoqué par les nombreux champs d'inondation où se déposent les limons fertiles du premier fleuve de Madagascar.

Les très fortes précipitations qui peuvent s'abattre sur la côte Est entraînent des crues brutales et importantes, la cause qui les engendre ayant souvent une grande extension.

Les fortes pentes accroissent les vitesses de propagation dans des lits profonds et bien calibrés. Les montées sont fréquemment de l'ordre de 4 à 5 m. Les débits spécifiques ont des valeurs élevées moins variables avec la latitude qu'avec les conditions d'exposition. Il est certain que les crues

de la Rianila et surtout celles de l'Ivondro sont relativement plus importantes que celles du Mangoro qui coule au fond d'une vallée transversale abritée des vents pluvieux.

Sur la Montagne d'Ambre, les crues sont peu importantes, compte-tenu d'une pluviosité aussi forte que sur la côte Est. Le caractère essentiellement perméable du sol réduit les crues en absorbant une hauteur d'eau importante. La couverture végétale freine également le ruissellement. La pente très forte des cours d'eau engendre cependant des montées brutales du plan d'eau, le retour au débit de base, assez élevé, étant lui-même rapide.

Sur les Plateaux, les crues moyennes semblent assez régulières, en particulier sur l'Ikopa, pour lequel on a des observations prolongées. Les perturbations venant généralement de l'Est, se sont épuisées sur la grande falaise de la côte Est et ne provoquent pas de crues très abondantes.

Dans le Sud et le Sud-Ouest de l'Ile, les crues sont très rapides, parfois même instantanées. Des véhicules ont été emportés au passage d'une rivière, l'onde de crue déferlant sur un lit presque à sec à la vitesse « d'un cheval au galop ». Sur les bassins versants inférieurs à 5.000 km<sup>2</sup>, les crues ne durent que quelques heures. Le ruissellement est intense et les débits spécifiques élevés sur les parties supérieures des bassins versants disposés souvent en éventail et pour la plupart imperméables. Les pentes moyennes sont également très fortes. La date des crues dans cette région est essentiellement variable, mais se situe généralement de décembre à mars.

Les cours d'eau appartenant aux régimes mixtes présentent des crues aux débits spécifiquement modérés. Les surfaces des bassins versants sont généralement importantes et l'influence des Hauts-Plateaux d'où descend la plupart des grands fleuves se fait sentir. Les vents pluvieux soufflant toujours de décembre à avril, les dates des hautes eaux ne sont pas décalées par des phénomènes complexes d'alimentation. Seuls, l'Ikopa et la Betsiboka présentent une particularité. Les précipitations vont en croissant vers leur embouchure et déterminent, lors des crues, des débits spécifiques qui augmentent vers l'aval, supérieurs entre autres à ceux des Plateaux.

Le Mangoky, qui vient aussi des Plateaux, ne présente pas cette alimentation privilégiée et se contente de crues plus modestes, quoique très brutales et très irrégulières d'une année à l'autre.

## Chapitre V

### VARIATIONS ANNUELLES DE DÉBITS

Nous donnons, ci-joint, un certain nombre de courbes types caractérisant pour chaque régime défini précédemment l'allure générale des variations du débit au cours de l'année.

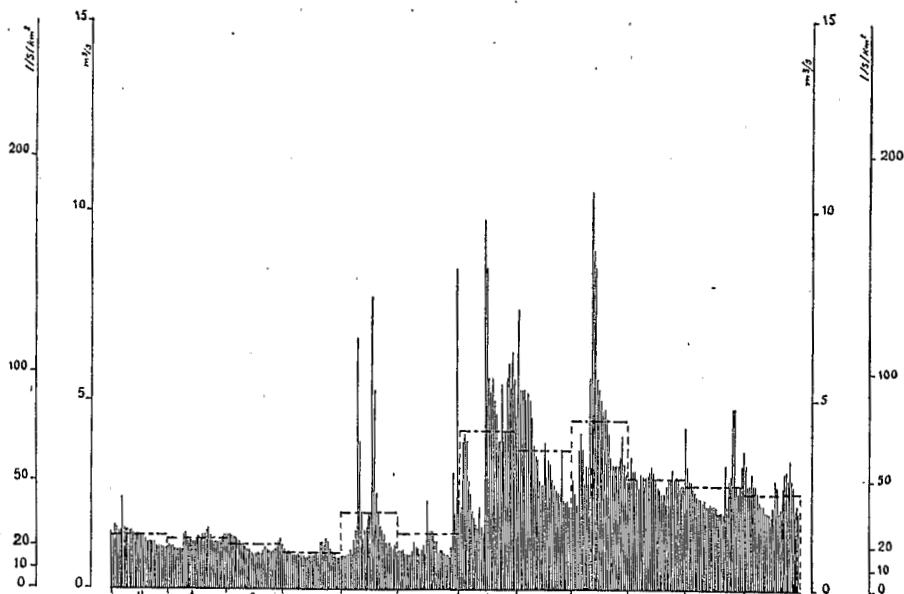


FIG. 11. — Variations annuelles des débits du Sakaramy Be à Joffreville.

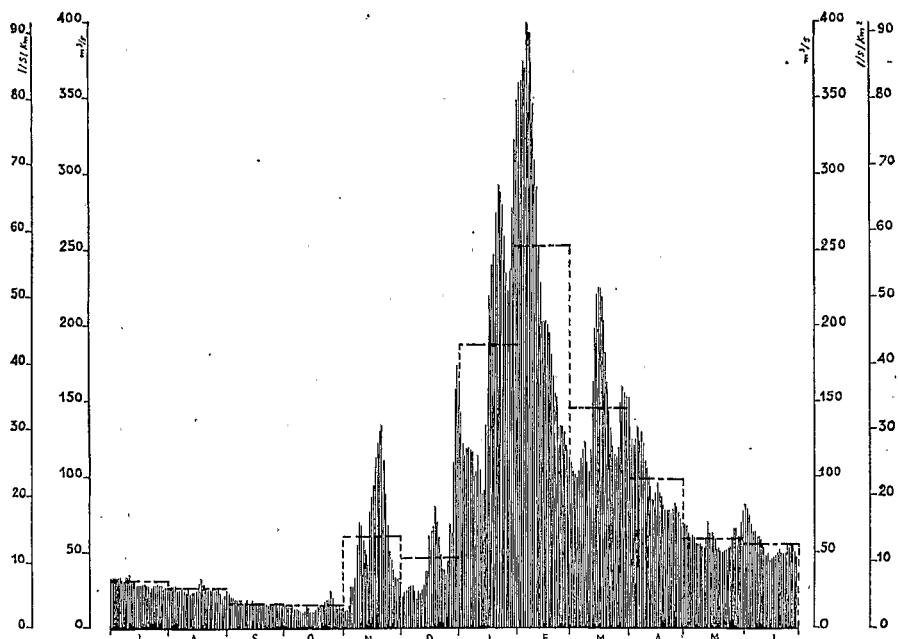


FIG. 12. — Variations annuelles des débits de l'Ikopa à Bevomanga.

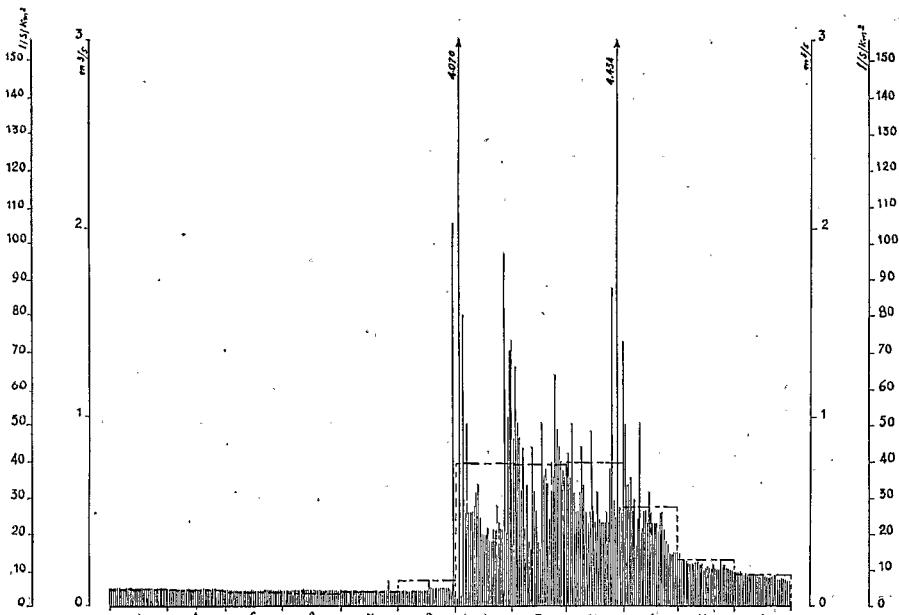


FIG. 13. — Variations annuelles des débits de la Mandraka au P.K. 68.68.

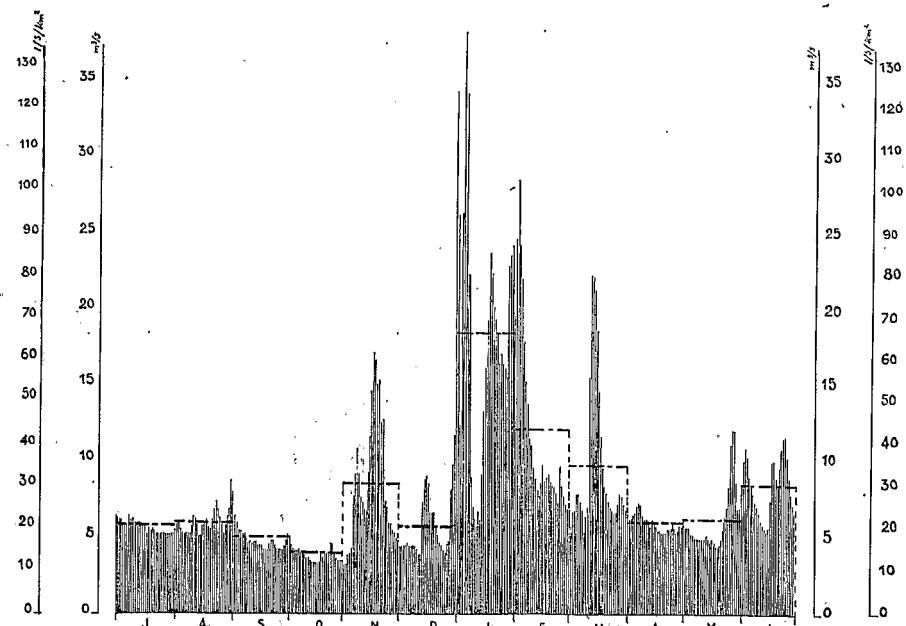


FIG. 14. — Variations annuelles des débits de la Varahina-Sud à Tsiaziompaniry.

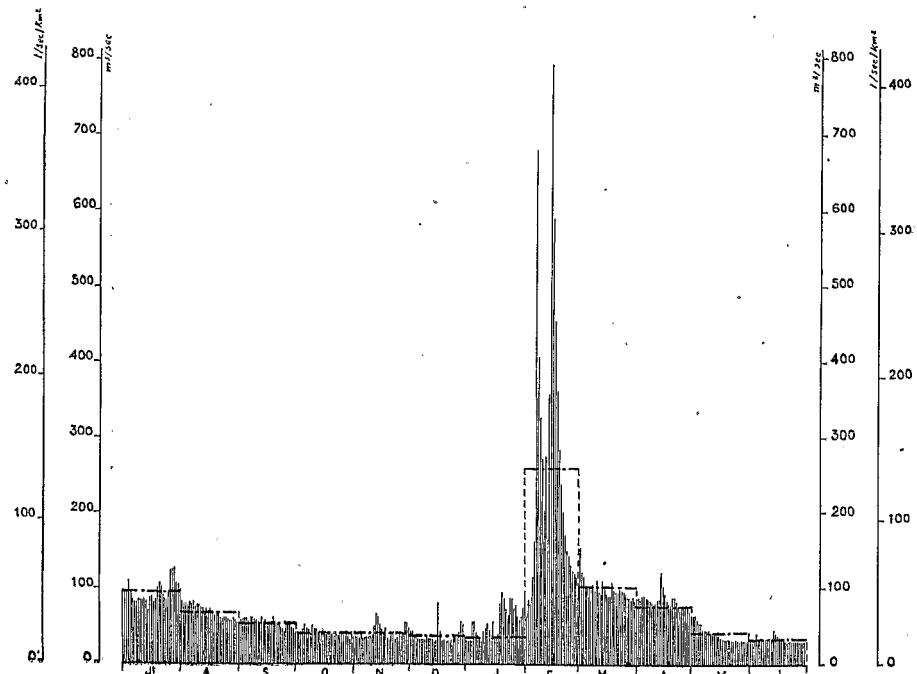


FIG. 15. — Variations annuelles des débits de la Vohitra à Rogez.

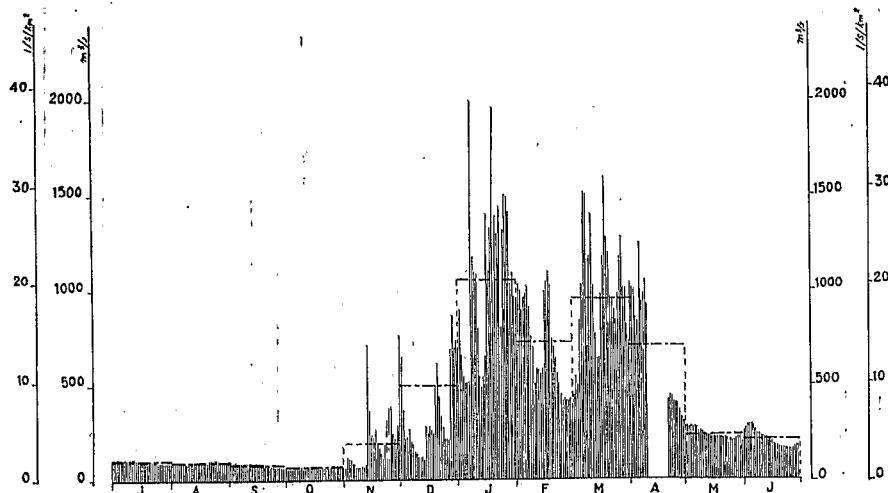


FIG. 16. — Variations annuelles des débits du Mangoky à Vondrove.

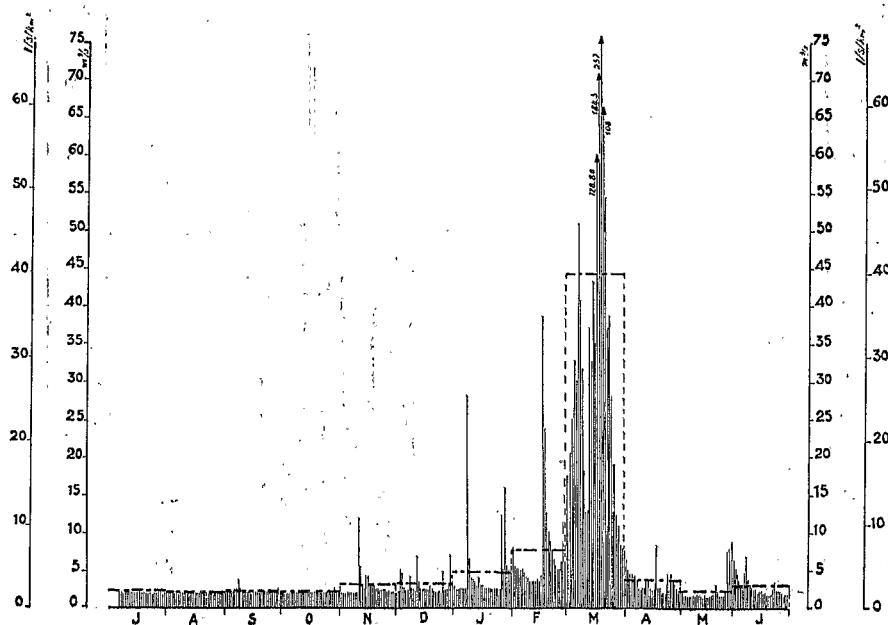


FIG. 17. — Variations annuelles des débits de la Mananara à Bevia.

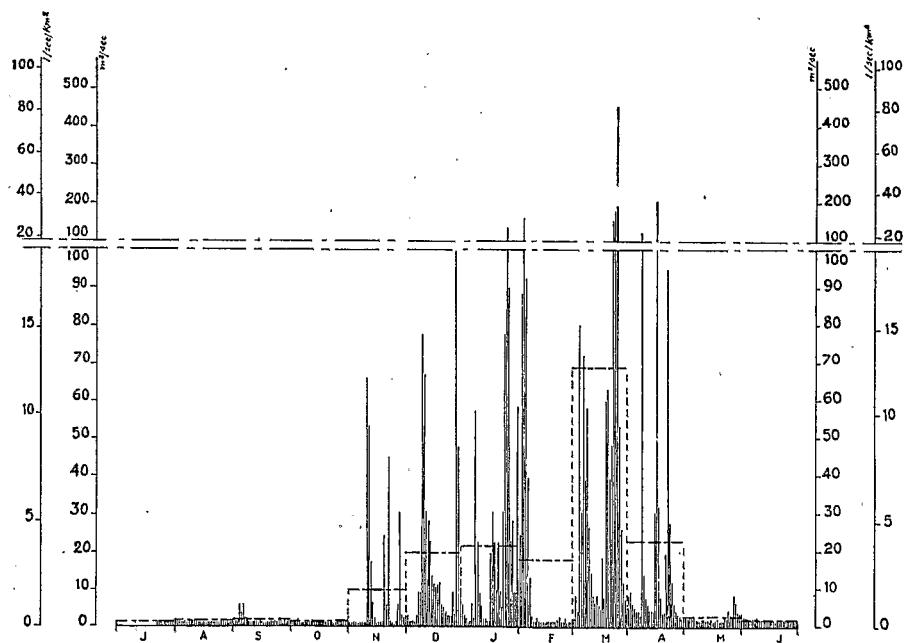


FIG. 18. — Variations annuelles des débits du Menarandra à Tranoroa.

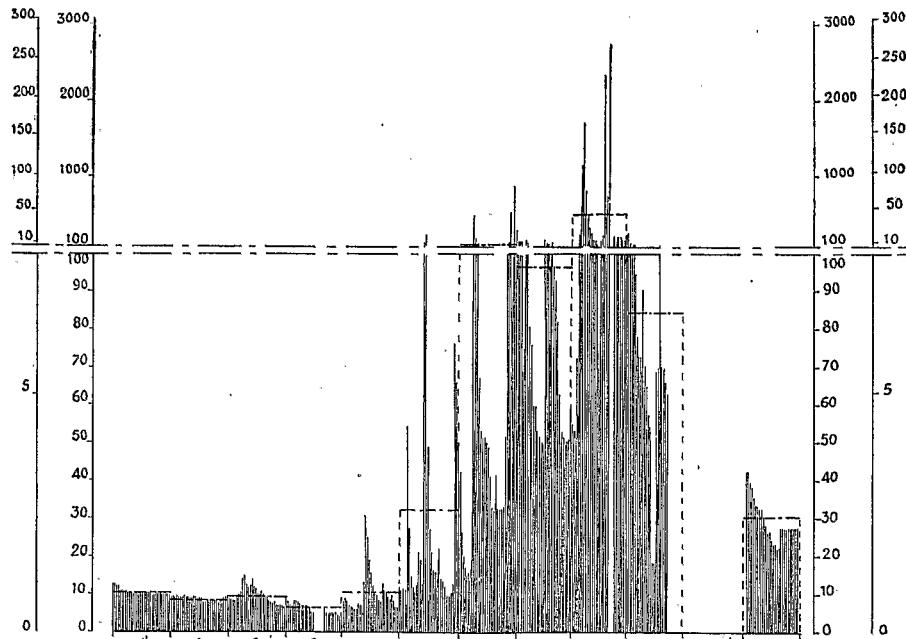


FIG. 19. — Variations annuelles des débits du Mandrare à Amboasary.

## Chapitre VI

### CRUES EXCEPTIONNELLES

L'intérêt de l'étude des crues exceptionnelles n'est plus à démontrer. Les débits parfois énormes que peuvent rouler les fleuves tropicaux dépassent souvent les estimations les plus pessimistes d'après lesquelles ont été dimensionnés certains ouvrages.

A Madagascar, des ponts ont été emportés par des crues violentes et la destruction du pont de Brickaville, utilisé par le T.C.E., lors du cyclone des 7 et 8 mars 1949, reste un exemple présent à toutes les mémoires.

L'étude des crues exceptionnelles se heurte à Madagascar à une absence presque totale d'archives et principalement à un manque total de relevés portant sur une longue période, comme on peut en trouver en France et même en Afrique Noire. Dans les cas les plus favorables, on pourra calculer la crue décennale ou duodécennale (une chance sur 10 ou une chance sur 20) (Tableau IV).

Il est possible qu'au voisinage des anciens centres de colonisation on puisse, moyennant des enquêtes minutieuses, rétablir certains faits observés une fois ou deux depuis l'installation des européens à cet endroit. Ce genre de recherches pourra être mené avec beaucoup de chances de succès sur la côte Est, la basse Betsiboka et peut-être sur le Sambirano.

La distinction entre grands et petits bassins versants éliminée précédemment, prend ici plus d'importance, les causes des crues exceptionnelles pouvant être très différentes : les cyclones et les orages.

Pour les petits bassins versants, les précipitations maxima en 24 h que nous citons dans le tableau IV, sont à prendre sans aucune modification. Sur de très petites surfaces, il est probable que les gros orages qui précèdent la saison des pluies entraînent des crues exceptionnelles.

Ces perturbations orageuses peuvent, dans certains cas, avoir une grande extension et déterminer sur des bassins versants de quelques milliers de kilomètres carrés des crues notables. En mars 1941, on a enregistré une crue importante sur l'Ikopa, 380 m<sup>3</sup>/sec. d'origine orageuse.

Nous donnons, ci-dessous, quelques intensités maximales horaires dues principalement à des orages :

DIEGO-SUAREZ :	75 mm.	TAMATAVE :	100,0 mm.
MAJUNGA :	117,4 mm.	TANANARIVE :	65,0 mm.
FORT-DAUPHIN :	68 mm.	TULEAR :	70,0 mm.
MAINTIRANO :	56,0 mm.		

TABLEAU IV

## CRUES EXCEPTIONNELLES

	B. V. km <sup>2</sup>	Débit annuelle m <sup>3</sup> /sec.	Débit de crue except.	
Vohitra .....	1.950	500	1.100	
Varahina-Sud .....	288	43	380	Cyclone
Ikopa .....	4.190	275	500	Crue décennale
Sahabe .....	992		310	En janvier 1951
Namorona .....	325	67	420	
Mandraka .....	53	20	35	
Menarandra .....	5.520	800	= 2.500	Cyclone 1951
Mandrare .....	12.650	2.770	7.400	Cyclone janvier 1951

## PRÉCIPITATIONS MAXIMA JOURNALIÈRES A MADAGASCAR

## 1) RÉGION EST.

Pluviométrie comprise entre 2.000 et 3.000 mm.

Hauteur d'eau maximum en 24 h. aux diverses stations.

380,0 — 328,8 — 328,2 — 312,5 — 297,7 — 282,4 — 282,1 —  
 282 — 282 — 280 — 279,4 — 271,3 — 252,8 — 251,5 — 247,1 —  
 244,5 — 242,6 — 236,5 — 236,4 — 229,1 — 228 — 224 —  
 219,8 — 218,6 — 217,3 — 178,8 — 177,9 — 168,3 — 164,3 —  
 158,7 — 148,7 — 120,2 —

## 2) RÉGION MONTAGNE D'AMBRE ET SAMBIRANO.

Pluviométrie moyenne comprise entre 1.500 et 2.500 mm.

Hauteur d'eau maxima en 24 h. aux diverses stations.

568,2 — 508,1 — 367,1 — 306,0 — 256,1 — 252,9 — 234 — 188,2 —  
 175,0 —

## 3) RÉGION OUEST ET PLATEAUX.

Pluviométrie comprise entre 1.000 et 2.000 mm.

Hauteur d'eau maxima en 24 h. aux diverses stations.

341,8 — 288,4 — 274 — 277 — 267,6 — 245 — 239,8 — 224 —  
 188,2 — 186,5 — 178,9 — 171,7 — 169,5 — 166,6 — 166,1 — 163 —  
 162,8 — 151,6 — 147,5 — 145,9 — 145,3 — 135,3 — 135,3 — 133,3 —  
 133,2 — 128,9 — 126,6 — 123,2 — 121,8 — 120 — 118,7 — 114,8 — 114,7 —  
 113,3 — 111,3 — 109,2 — 106,5 — 105,1 — 102,3 — 101,9 — 97,5 —  
 92 — 88,8 — 86,6 — 77,5 —

## 4) RÉGION SUD ET SUD-OUEST.

Pluviométrie comprise entre 300 et 1.000 mm.

Hauteur d'eau maxima aux diverses stations en 24 h.

322,4 — 313 — 295 — 286,4 — 285 — 284,1 — 269,3 — 250,4 —  
 250,3 — 247,8 — 242,2 — 216 — 214,6 — 212,9 — 205,9 — 200 —  
 186,1 — 186 — 179,2 — 168,5 — 166,8 — 165,1 — 154 — 150,3 —  
 150,2 — 150 — 149,3 — 143,6 — 138,4 — 128,1 — 127,2 — 126,2 —  
 125,1 — 123 — 119,2 — 116,8 — 115 — 190,5 — 105,6 — 105,1 —  
 100,8 — 99,8 — 94,7 — 88,5 — 85,8 —

Pour les grands bassins versants, une seule cause peut déterminer les grandes crues : les cyclones. De nombreux cyclones abordent Madagascar, principalement en saison des pluies et ces météores engendrent des pluies violentes, parfois de très longue durée, et couvrant toujours de grandes surfaces. Ces pluies soutenues ruissellent presque sans perte sur un sol saturé et font monter de plusieurs mètres les fleuves de la côte Est en particulier. La Rianila a pu ainsi monter de près de 10 m en 1949 et le Faraony de plus de 20 m à la gare de Sahasinaka.

Certaines crues, comme celle de 1927 sur l'Ivondro, peuvent dégénérer en véritables catastrophes lorsque la mer s'élève sous l'influence d'une forte marée ou d'un raz de marée, interdisant ainsi l'évacuation des débits.

Les cyclones sont plus ou moins déviés et atténués par le relief, mais on peut envisager la catastrophe que produirait un cyclone descendant les larges vallées des grands fleuves malgaches. Aucune région de l'Ile n'est à l'abri des cyclones et seule leur fréquence varie dans des limites encore mal définies. Lorsque les relations hauteurs débits seront mieux connues, à Madagascar, et que quelques crues importantes auront été analysées, il sera possible, grâce aux études déjà anciennes sur les cyclones, d'estimer les crues de très faible probabilité. Il est possible que les lois régissant ces débits soient relativement simples, les très hautes eaux étant dues à une cause unique. Les chiffres que nous citons dans le tableau des crues exceptionnelles ne sont que des extrapolations. Les estimations de ces débits ont été faites à partir de jaugeages de hautes eaux, de cotes de délaissés de crues ou d'indications de zones inondées recueillies sur place.

Pour l'Ikopa et la Varahina-Sud, M. CAMUS a pu faire une étude statistique et en déduire une évaluation de la crue décennale. Les crues de janvier 1952 (400 m<sup>3</sup>/sec.) et janvier 1954 (1000 m<sup>3</sup>/sec.) perturbent sur l'Ikopa la répartition des forts débits admise sur la base des résultats acquis en 1949 et déplacent probablement les valeurs données en augmentant les débits pour une même probabilité.

Des crues de fréquence certainement assez faible ont pu être observées et estimées en 1951-1952 dans le Sud de Madagascar.

Deux cyclones, dont l'un extrêmement violent en janvier 1951, ont affecté cette région. Durant deux saisons des pluies consécutives, les débits maxima ont atteint des valeurs élevées. La fréquence de ces débits ne peut pas évidemment être précisée puisque nous ne possédons que deux ans de relevés sur ces rivières, mais l'examen des précipitations maxima journalières fait particulièrement ressortir les chiffres mesurés en 1951.

Les précipitations enregistrées lors de ce cyclone ont atteint 247,8 mm à Ambovombe, où l'ancien maximum était de 147,5 mm. Les maxima en 24 h ont été de 100,8 mm à Behara, 250,3 à Beloha, 214,6 à Ampasimpolaka, dépassant de loin les maxima connus jusqu'à cette date. La côte Sud-Est, qui a été touchée par le météore de 1951, a enregistré également des totaux

journaliers jamais atteints. Ce fut le cas de Fort-Dauphin, 218,6 contre 214,6, ancien maximum Nahampona : 380,0 mm.

Ces derniers chiffres sont particulièrement éloquents. En effet, les cyclones atteignant Ambovombe ne sont pas très fréquents et on aurait pu croire qu'il s'agissait d'un phénomène assez localisé. En réalité, le fait que les précipitations aient été exceptionnelles, même dans la région de Fort-Dauphin où les cyclones sont fréquents, montre mieux le caractère exceptionnel des cyclones de mars 1952 et surtout de janvier 1951.

On peut se faire une idée un peu moins vague de la fréquence de cyclones de cet ordre : dans la « Documentation statistique sur les cyclones malgaches » du R. P. POISSON, nous dénombrons moins de 20 cyclones ayant parcouru ou seulement effleuré le Sud de Madagascar, de 1848 à 1952, soit plus d'un siècle. Il convient d'ailleurs de préciser que sur ces 20 cyclones, 4 ou 5 au maximum peuvent être qualifiés de violents. Nous ne possédons pas les relevés pluviométriques correspondant au passage de ces phénomènes, néanmoins, il semble qu'on peut déduire de ce qui précède que la crue due au cyclone de janvier 1951 correspond à une probabilité de 1/25 ou même plus faible, 1/50.

Sur la côte Est, ce sont 140 cyclones, et peut-être plus, la période de 1848 à 1888 étant mal connue, qui se sont abattus, faisant éprouver à toutes les agglomérations de cette région des dégâts considérables.

Il se peut que les maxima pluviométriques enregistrés en 24 h n'aient pas entraîné pour toutes ces rivières les crues exceptionnelles. Nous pouvons citer à l'appui l'exemple suivant observé sur la côte Est. Les précipitations maxima pour les stations du T.C.E. ne se situent pas en mars 1949, bien que la crue la plus forte de la Vohitra se soit produite à cette date. Seules les stations inférieures de cette rivière accusent des maxima de débits en rapport avec les précipitations maxima. La répartition des pluies pendant les 24 h a donc une importance prépondérante quand l'intensité ne s'éloigne pas d'une valeur minima qu'il est difficile de préciser. Ceci n'est valable, bien entendu, que pour les petits bassins.

Les Plateaux sont relativement bien protégés des cyclones et lorsque de telles perturbations franchissent la falaise de la côte Est, elles sont déjà partiellement comblées et ne causent pas de dégâts très importants. De même, les cyclones du Mozambique s'affaiblissent à gravir les Plateaux, les distances à parcourir étant encore plus grandes.

Les intensités décroissent de l'Est vers les Plateaux et les fortes valeurs que nous citons dans le tableau ont été relevées sur la côte Ouest (Soalala : 341,8 — Majunga : 274,0). Sur les Plateaux, les valeurs maxima ne dépassent pas 200 mm en 24 h.

Les régions de la Montagne d'Ambre et du Sambirano présentent les intensités maxima les plus fortes qui aient été observées à Madagascar. Ces maxima dépassent de beaucoup ceux de la côte Est par exemple. Il semble que ce soit le relief qui détermine ces déluges. Le maximum, 568,2 mm,

se situe à Ambanja au pied du plus haut sommet de Madagascar, le Tsaratanana (2.886 m).

A quels débits de crue peuvent correspondre ces précipitations ? Les chiffres maxima donnés plus haut correspondent évidemment à des valeurs isolées, valables seulement pour une station. En principe, si nous considérons un bassin de superficie donnée entourant le pluviomètre, il est fréquent que la hauteur de précipitation maximum relevée au pluviomètre soit supérieure à la hauteur d'eau moyenne qui pourrait être observée sur ce bassin le même jour, l'écart étant d'autant plus grand que la superficie est plus grande. Mais les cyclones sont des phénomènes très homogènes de sorte que les grandes surfaces qu'ils couvrent, plusieurs milliers de  $\text{km}^2$ , peuvent recevoir des précipitations énormes en un ou plusieurs jours. Le cyclone de janvier 1951, dans le Sud, qui donna leur maximum à presque toutes les stations de la région, s'étendit de Fort-Dauphin, à Tongobory, et même à Tuléar. Les précipitations perdirent leur caractère exceptionnel à l'Ouest de Benenitra.

Les débits qui résultent de ces précipitations dépendent aussi des autres facteurs conditionnels. On doit pouvoir observer des débits spécifiques de 1,5 à 2  $\text{m}^3/\text{sec}/\text{km}^2$  sur la côte Est pour des bassins versants de quelques milliers de  $\text{km}^2$ .

Plusieurs cours d'eau de cette région ont déjà connu des crues importantes. En considérant les hauteurs d'eau maxima que nous indiquons pour cette région, on constate que la valeur maximum maximorum de 380,0 mm observée à un pluviomètre donné, n'est pas très supérieure aux autres. Il est donc possible que sa probabilité ne soit pas extrêmement faible, ce qui, par ailleurs, ne doit pas surprendre, les relevés ne s'étendant que sur 20 ans environ.

Le Sambirano et la Montagne d'Ambre, semblent susceptibles de crues encore plus violentes, compte-tenu des maxima dépassant 500 mm en 24 h. La probabilité de telles averses est certainement très faible, l'écart à la moyenne étant très grand. Pour utiliser ces résultats pour des cours d'eau drainant quelques milliers de  $\text{km}^2$ , il faudra tenir compte des caractéristiques des bassins versants et, en particulier, du relief.

Pour ces cours d'eau, nous avons trop peu de renseignements pour donner un chiffre, même approché, les coefficients d'écoulement sont, en particulier, absolument inconnus. Il serait prudent d'adopter des chiffres supérieurs à ceux de la côte Est.

Le caractère perméable de la Montagne d'Ambre impose également des réserves et semble atténuer les crues importantes. Mais la persistance des pluies pendant plusieurs jours pourrait entraîner une saturation du sol et un ruissellement très important.

Sur les Plateaux, les crues exceptionnelles semblent plus modérées. Pour un bassin versant comme celui de l'Ikopa à Bevomanga, on peut supposer des maxima locaux pluviométriques ne dépassant 150 mm, mais la détermination de la valeur moyenne sur le bassin versant est très délicate

à faire. Elle est plutôt du domaine de l'expérience. M. CAMUS a évalué la crue centenaire de l'Ikopa à  $720 \text{ m}^3/\text{sec}$ , soit un peu moins de  $200 \text{ l/sec/km}^2$ . Cette évaluation est peut-être optimiste. Des études sur bassins versants expérimentaux seront entreprises pour préciser ce point (2).

Comme nous l'avons déjà signalé, les crues déterminées dans le Sud par le cyclone de 1951 peuvent être considérées comme exceptionnelles. On tiendra compte de débits spécifiques au moins égaux à  $500 \text{ l/sec/km}^2$  pour un bassin versant comme celui du Mandrare et plus encore  $800 \text{ l/sec/km}^2$  et même  $1 \text{ m}^3/\text{sec/km}^2$ , pour des bassins versants plus petits.

Pour d'assez grands bassins,  $30.000$  à  $50.000 \text{ km}^2$  (Onilahy, Mangoky), on pourrait prendre en considération des chiffres un peu plus faibles :  $200$  à  $300 \text{ l/sec/km}^2$ .

Les crues exceptionnelles à Madagascar ne sont donc pas comparables aux maxima mondiaux. Elles seraient inférieures, par exemple, aux crues des fleuves méditerranéens. Elles sont nettement supérieures aux crues d'Afrique Noire. Il semble que cette différence soit due à la rigueur du relief et surtout à la forme cyclonique des précipitations, beaucoup plus dangereuse que la tornade classique.

Il est à noter que les maxima journaliers sont indépendants de la pluviométrie annuelle, c'est-à-dire qu'au point de vue hydrologique on peut avoir des débits spécifiques aussi élevés dans le Sud que sur la côte Est.

## Chapitre VII

### IRRÉGULARITÉ INTERANNUELLE

Les relevés hydrologiques s'étendent, en général sur des périodes encore trop courtes pour que l'on puisse fixer, pour l'irrégularité interannuelle, des chiffres définitifs.

Nous disposons, pour les seules rivières des Plateaux, d'environ dix années d'observations. Parmi ces dix années, on note :

- les années 1939-40, 1940-41, 1951-52, avec forte pluviométrie ;
- les années 1941-42, 1943-44, 1949-50 avec faible pluviométrie.

Sans avoir des valeurs exceptionnelles, les coefficients d'irrégularité que nous donnons représentent les valeurs moyennes normalement rencontrées.

Nous avons pu faire un calcul identique pour la Vohitra, en utilisant des relevés déjà anciens (1932-1937) et 1948-1950.

Nous définirons l'irrégularité interannuelle par les trois coefficients :  
 $K_1 = M/\mu$        $K_2 = m/\mu$        $K_3 = M/m = K_1/K_2$

(2) Le cyclone de janvier 1954 sur Tananarive a donné  $380 \text{ m}^3/\text{sec}$ . sur la Varahina-Sud et  $900 \text{ m}^3/\text{sec}$ . à l'entrée de l'Ikopa dans la plaine du Betsimitatatra pour  $1.300 \text{ km}^2$  de bassin versant.

avec  $M$  : débit moyen annuel le plus élevé pendant la période considérée,

$m$  : débit moyen annuel le plus faible pendant la période considérée,

$\mu$  : moyenne des débits moyens annuels pendant la période considérée.

Nous donnons, dans le tableau ci-dessous, les résultats concernant l'Ikopa et la Varahina-Sud. Nous indiquons dans des colonnes voisines les valeurs des coefficients  $K_1$  et  $K_2$  et  $K_3$  obtenus en substituant la pluviométrie au débit dans la définition des coefficients  $K'_1$ ,  $K'_2$ , et  $K'_3$ . Les débits moyens annuels peuvent se déduire de la pluviométrie en élevant les hauteurs d'eau annuelles à une puissance généralement comprise entre 1 et 2, les coefficients  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  présentent donc des valeurs moins irrégulières que les coefficients  $K'_1$ ,  $K'_2$ ,  $K'_3$  correspondants.

On constate sur les Plateaux une irrégularité interannuelle faible et minimum pour Madagascar. La côte Est présente des chiffres analogues, mais pour un total pluviométrique double de celui des Plateaux. L'irrégularité des débits sera donc plus marquée. Les chiffres que nous citons pour la Vohitra sont basés sur un nombre d'années trop faible pour avoir une signification moyenne.

Les régions du Sud-Ouest et du Sud, à faible pluviométrie moyenne, présentent des coefficients importants. L'influence relative d'un orage et *a fortiori*, d'un cyclone, est évidemment plus forte sur un total annuel de 500 mm que sur une pluviométrie de 2.000 mm.

Diégo-Suarez et Tuléar présentent l'irrégularité maxima. Les rivières de la Montagne d'Ambre relèvent plus certainement des coefficients déterminés aux Roussettes.

TABLEAU V

Cours d'eau	Pluv.	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K'_1$	$K'_2$	$K'_3$	Régime
Ikopa à Bevomanga ....	1.322	1,62	0,653	2,48	1,39	0,74	1,9	Hauts-Plateaux
Varahina-Sud .....	1.552	1,32	0,755	1,75	1,24	0,755	1,64	
Vohitra.....	2.000	1,2	0,795	1,51				Côte Est

Nous donnons, dans le tableau suivant, les coefficients  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  relatifs à diverses stations météorologiques permettant d'avoir quelques notions sur l'irrégularité interannuelle malgré l'absence de relevés hydrologiques.

Station	Pluv. annuelle	$K'_1$	$K'_2$	$K'_3$	Régime hydrologique correspondant
Tamatave .....	3.425	1,43	0,682	2,26	Côte Est
Brickaville .....	2.850	1,535	0,65	2,36	
Ambanja .....	2.060	1,295	0,605	2,14	Sambirano
Diego-Suarez .....	983	2,42	0,465	5,2	Montagne d'Ambre
Roussettes .....	3.345	1,32	0,728	1,825	
Majunga .....	1.520	1,93	0,645	299	Côte Ouest
Fianarantsoa .....	1.220	1,462	0,628	2,345	
Tananarive .....	1.345	1,62	0,645	2,51	
Ankazoabo.....	745	1,82	0,498	3,69	
Tuléar.....	360	2,125	0,229	9,3	Sud-Ouest et Sud
Ambovombe .....	603	1,78	0,512	3,48	

## Chapitre VIII

### COEFFICIENT DE RUISELLEMENT ET DÉFICIT D'ÉCOULEMENT

Les définitions des coefficients de ruissellement et déficit d'écoulement résultent de l'équation du bilan hydrologique qui s'écrit généralement ainsi :

$$P + A = V + E + I - C + A'$$

P : volume des précipitations,

A : volume des réserves souterraines à l'origine de la période d'observations,

V : volume écoulé,

E : pertes par évaporation et respiration de la couverture végétale,

I : pertes définitives par infiltration,

C : condensation,

A' : volume des réserves à la fin de la période d'observations.

Il est difficile d'évaluer les volumes A et A'. On est donc conduit à adopter une période d'observations telle que A — A' soit nul ou voisin de zéro.

L'étiage absolu se produit généralement en octobre. Les relevés météorologiques étant décalés de six mois sur l'année calendaire, nous avons adopté la même période. L'année hydrologique commence donc le 1<sup>er</sup> juillet et se termine le 30 juin. On aura :

$$D = P - V = E + I - C$$

$$R = \frac{V}{P} = I - \frac{E + I - C}{P}$$

Les grandeurs mesurables sont V et P. Pour obtenir des résultats assez précis, il faut sur V et P des erreurs minima. Pour déterminer V, il faut un tarage précis de la station de jaugeage qui ferme le bassin versant considéré. La détermination exacte de P est beaucoup plus délicate. Il faut un nombre important de pluviomètres bien répartis dans le bassin versant et aux abords du bassin versant.

A Madagascar, on compte un pluviomètre par 1.000 km<sup>2</sup> en moyenne. On est donc obligé de ne considérer que les grands bassins versants pour éviter les influences des petits climats locaux.

On aura de même intérêt à considérer la période la plus longue possible pour diminuer d'autant la valeur de A — A' qui est la plus grosse source d'erreurs dans un bilan hydrologique.

Si nous avions appliqué intégralement ces règles générales, nous n'aurions pu calculer qu'un nombre restreint de coefficients de ruissellement. Nous

avons voulu donner le plus grand nombre d'exemples possible, en admettant un pourcentage d'erreurs, difficile à apprécier, mais sûrement inférieur à 15 ou 20 %.

TABLEAU VI

## VALEUR DU DÉFICIT D'ÉCOULEMENT

	Pluviométric annuelle	Déficit d'écoulement	Régimes
Vohitra .....	2.150	630	Côte Est
Onibe .....	1.600	850	
Sakaramy-Be .....	2.500	1.915	Montagne d'Ambre (infiltrations impor- tantes)
Mandraka .....	2.208	878	Hauts-Plateaux + Côte Est
Ikopa à Bevomanga...	1.322	790	Hauts-Plateaux
Varahina-Sud .....	1.552	622	
Sahabe (Alaoatra) .....	1.220	760	
Menarandra .....	695	613	Sud et Sud-Ouest
Mangoky .....	1.050	803	Hauts-Plateaux + Sud-Ouest
Onilahy .....	863	704	Hauts-Plateaux + Sud-Ouest
Mandrare .....	771	576	Sud + Côte Est
Mananara .....	882	691	Sud + Côte Est

Les déficits à Madagascar sont faibles par rapport aux chiffres calculés en Afrique par exemple. Deux facteurs sont responsables de cette différence à pluviométrie égale. D'une part, la température, qui limite l'évaporation et qui est plus faible dans la Grande Ile qu'en Afrique, et d'autre part, le relief accentué qui donne aux bassins versants des pentes générales fortes, propices à un écoulement rapide. Les crues sont plus brutales qu'en Afrique et fournissent au total annuel ruisselé d'importants volumes, éoulés très rapidement, donc avec des pertes minima.

L'homogénéité des déficits pour un même régime est assez difficile à mettre en évidence, car trop de facteurs diffèrent d'un cours d'eau à l'autre. L'altitude, par exemple, réduit considérablement le déficit dans le bassin versant de la Varahina-Sud par rapport à celui de l'Ikopa.

Dans le Sud, les déficits d'écoulement ont été calculés après une année d'observations hydrologiques et, quoique vraisemblables, les résultats sont altérés par les cyclones de janvier 1951 et mars 1952. Le terme A — A' est positif, et donne au déficit une valeur inférieure à la normale.

Sur la côte Est, la très forte pluviométrie, analogue à celle du climat équatorial, est protégée contre l'évaporation par les très fortes pentes, le couvert végétal épais et une température moyenne de 20 à 22°. Il semble toutefois, que le chiffre de 630 mm calculé pour la Vohitra soit trop faible. En fait, les relevés hydrologiques sont douteux, le limnigraphie de Rogez n'étant pas d'un fonctionnement très sûr.

L'utilisation de ces résultats devra donc être précédée d'une étude détaillée du bassin versant dont on veut estimer les caractéristiques hydrologiques à partir de la pluviométrie annuelle et d'un coefficient d'écoulement.

## ANNEXE

Ces études qui, comme nous l'avons souligné plusieurs fois au cours de cette note, n'ont pas encore de bases statistiques suffisantes, permettent déjà d'individualiser nettement les principaux régimes des rivières de Madagascar. Les problèmes d'équipement qui se posent pour la Grande Ile exigent des renseignements plus complets. Nous n'avons notamment que très peu de résultats concernant les transports solides. Néanmoins, ces « Données de base » dégagent des ordres de grandeur que les études en cours précisent au fur et à mesure de leur avancement.