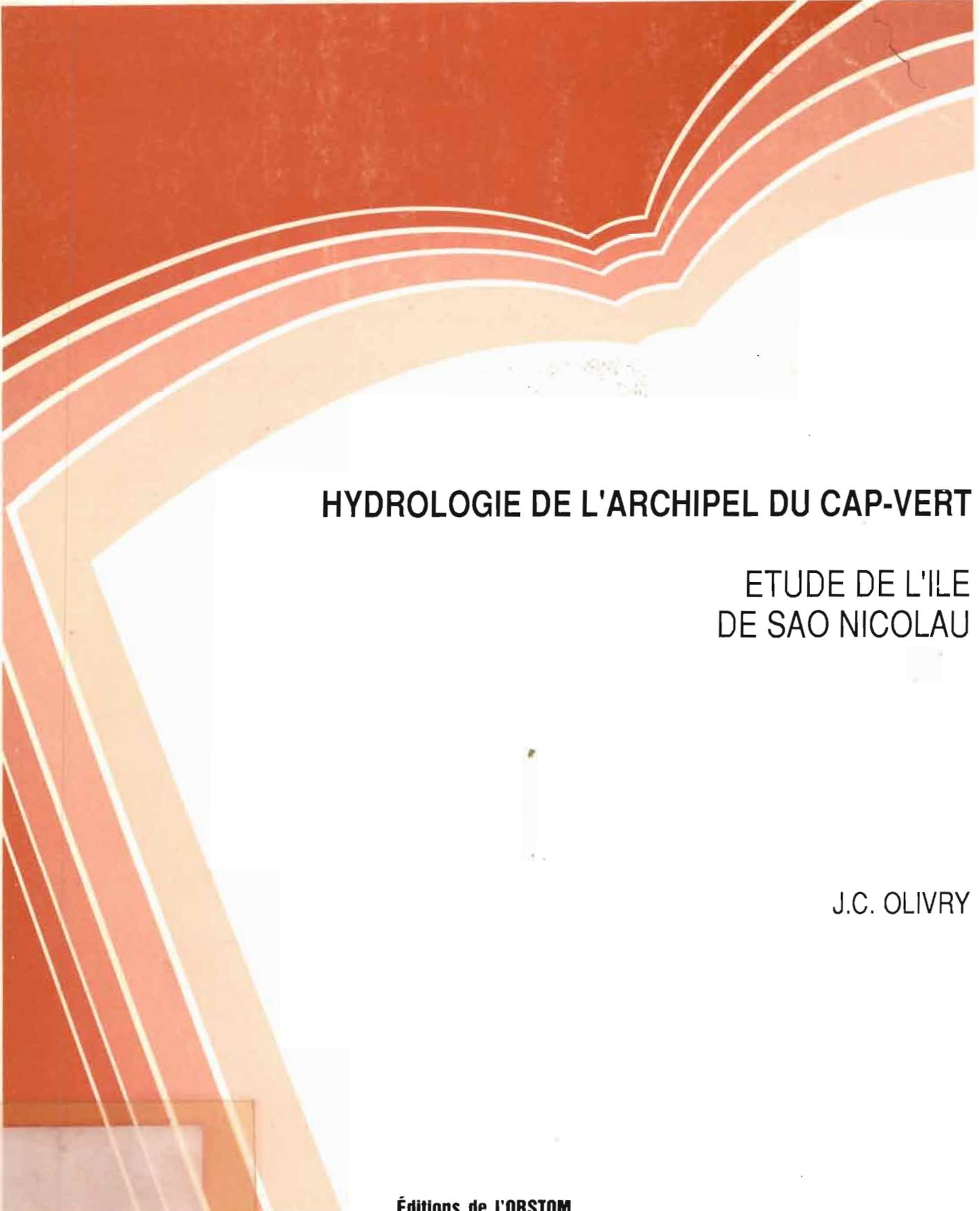


# Etudes et Thèses



**HYDROLOGIE DE L'ARCHIPEL DU CAP-VERT**

**ETUDE DE L'ILE  
DE SAO NICOLAU**

**J.C. OLIVRY**

**Éditions de l'ORSTOM**

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION



Republica do Cabo Verde  
Ministerio Desenvolvimento  
Rurale et Pescadore

République Française  
Ministère de la Coopération  
ORSTOM

## HYDROLOGIE DE L'ARCHIPEL DU CAP-VERT

# ETUDE DE L'ILE DE SAO NICOLAU

J.C. OLIVRY

et la collaboration de

J. LERIQUE, R. CALVEZ, R. GALLAIRE,  
R. HOORELBECKE, E. SERVAT,  
Y. LE TROQUER, R. RANDON.



~~F 26483~~



Si câ tem tchuba morrê di sede  
Si tchuba bem morrê fogado  
Gente sem sorte câ tem remede  
Tchora bô sina, tchora maguado.

(Extrait d'une "morna") \*

\* traduction libre :

(Extrait d'un chant  
créole cap-verdien).

*La pluie manque, on meurt de soif ;  
La pluie vient, on meurt noyé.  
Pour un peuple sans chance, pas d'autre remède,  
Que pleurer son destin, que pleurer de dépit.*

Etude achevée en 1987

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 reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit 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.

---

ISSN : 0767-2888  
ISBN : 2-7099-0946-4

---

© ORSTOM 1989

## AVANT - PROPOS

Il y a deux raisons qui m'ont décidé à mettre en exergue du présent ouvrage cet extrait d'un chant créole relativement pessimiste.

La première tient dans les quelques mots des deux premiers vers qui résument avec la plus grande concision la rigueur, les aléas et les conditions extrêmes du climat que connaît l'archipel du Cap-Vert avec le contraste entre les années de sécheresse mortelle et les instants de déluges dévastateurs. N'était-ce pas le problème posé dans nos études ?

La seconde se rapporte à l'apparente résignation populaire traduite par ce chant. Résignation apparente, car la musique dolente de la "Morna" traduit, certes, mélancolie, nostalgie, misère et douleur, mais aussi espoir de vivre partagé par des hommes et des femmes aimant se retrouver dans les réunions et les "Coladeras". Résignation démentie par une tradition ancienne de travaux de maîtrise des eaux, de conservation des sols, par les énergies laborieuses des populations rurales.

Résignation démentie encore par les priorités affichées par le Gouvernement de la République du Cap-Vert en matière de ressources en eau, par les actions réalisées par les responsables de l'Administration et, en particulier, au niveau du Ministère du Développement Rural, par les projets conduits conjointement par les Autorités Capverdiennes et l'aide extérieure.

L'étude présentée ici correspond à un des volets de l'aide du Ministère Français de la Coopération au développement de l'île de São Nicolau et a fait l'objet de Conventions avec le Gouvernement de la République du Cap-Vert. Notre projet, en particulier, a été établi à la suite d'une concertation entre Monsieur Horatio SOARES, Responsable de la Recherche au M.D.R.P. et Monsieur Marcel ROCHE alors Chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM. Le cadre administratif de ce projet a été défini par Monsieur Miguel LIMA, Directeur Général de l'Agriculture et Monsieur SABINO, Directeur de l'Aménagement des Ressources Naturelles. A São Nicolau, le projet a bénéficié du soutien de Monsieur Joseph CARDOSO puis de Monsieur Antonio ALVES dos REIS BORGES successivement Délégués du Gouvernement dans l'île; Que ces responsables et leurs collaborateurs trouvent ici le témoignage de notre gratitude pour l'aide apportée à la réalisation de notre mission. Nos remerciements s'adressent plus particulièrement à Monsieur Horatio SOARES qui a été notre interlocuteur permanent à Praïa et à Monsieur Antonio de SOUZA FREDERICO, Directeur du MDR à São Nicolau, avec lequel une collaboration étroite s'est maintenue pendant 5 années.

A Praïa, nous avons apprécié le soutien logistique des Chefs de la Mission Française de Coopération et en particulier de Messieurs FULLENWARTH et LE TREMBLE.

A São Nicolau, nous remercions pour leur aide ou leur collaboration les différentes équipes françaises travaillant de manière permanente aux projets financés par la Coopération Française, en tout premier lieu, l'équipe du BURGEAP avec Jean-Claude ANDREINI, Henri CHAUDANSON et Jean-Claude BASTIE, mais aussi Messieurs KALFANE, COURCIER, LEGAL, CHATELAIN, LE PAIH, LAINE et DEMARCK de la Coopération et de la SCET.

Enfin, au niveau de la réalisation de cet ouvrage à Montpellier, à l'issue de différents aléas, les auteurs remercient pour leur contribution : Jean-Pierre DEBUICHE et Jean-Claude MARCOUREL, dessinateurs, Maryse SICARD, Jeannette RAZANAMIADANA, Joëlle CANER et Marie-Christine LAYROLLE qui ont saisi et composé le texte, et Nathalie OLIVRY pour les corrections apportées à l'écriture.



## INTRODUCTION

Faire une étude d'hydrologie de surface aux Iles du Cap-Vert tenait de la gageure en regard de la rareté chronique des pluies, aggravée par la situation de sécheresse des vingt dernières années.

De fait, l'analyse du ruissellement et de l'érosion sur deux bassins représentatifs de l'île de São Nicolau nécessitait l'observation d'un minimum d'événements hydropluviométriques. La première convention d'études (campagnes 1978 et 1979) <sup>(1)</sup> n'a pas permis de collecter une information suffisante ; l'ORSTOM prolongeait alors son intervention sur les campagnes 1980 et 1981. Des rapports d'activités, de campagnes sur les précipitations étaient alors produits. On verra dans le corps de l'ouvrage la difficulté qu'il y aurait eu à analyser le maigre échantillon de données. Une deuxième convention <sup>(1)</sup> avec le Ministère Français de la Coopération devait permettre la poursuite des études en 1982. Mais l'année 1982 allait compter parmi les plus sèches de la décennie et l'ORSTOM, une fois encore, prolongeait ses mesures sur la saison des pluies 1983 et la saison sèche suivante (achèvement à la mi-1984) en orientant davantage ses travaux sur les eaux souterraines.

L'ORSTOM a donc assuré un suivi de 6 campagnes annuelles pour un financement prévu contractuellement pour 3 années.

Malgré cela, l'échantillon d'événements hydropluviométriques reste trop petit pour permettre des études statistiques classiques en hydrologie.

La synthèse proposée dans cet ouvrage s'est attachée dans une première partie à définir le milieu physique de l'Archipel et plus particulièrement celui de l'île de São Nicolau, sur les plans géographique et géologique, climatologique, des précipitations, et des problèmes posés au niveau de la ressource en eau.

Dans une deuxième partie, l'étude détaillée des deux bassins représentatifs du milieu à potentialités agricoles de l'île comprend une caractérisation de ces bassins et du programme de mesures prévu, puis l'ensemble des données d'observations recueillies en météorologie, en pluviométrie et en hydrométrie. L'étude hydrologique, sensu stricto, analyse les différents événements hydropluviométriques et propose des relations simples (pouvant servir à la détermination de crues décennales). Au niveau des autres mesures effectuées signalons le bilan d'érosion et en altitude, l'étude des précipitations occultes relevées.

Dans un dernier chapitre, l'étude du bilan hydrologique conduit directement à un modèle simple d'estimation de la recharge des nappes ; en complément de cette étude on a indiqué l'évolution des nappes souterraines et donné un aperçu des compositions chimiques et isotopiques de leurs eaux.

L'expérience de ces travaux conduit à une réflexion sur le suivi d'observations de longue durée sur des bassins comparables dans d'autres îles.

---

(1) Convention 12/C/DCT/77 CAV Projet 79/CD/77/CAV/11  
et Convention 169/C/DCT/81/CAV Projet 161/CD/81/CAV/11



Première Partie :

Présentation de l'Archipel du Cap Vert  
et de l'île de Saô Nicolau



# Chapitre I

## L'ARCHIPEL DES ILES DU CAP VERT

# RÉPUBLIQUE DES ILES DU CAP-VERT

## SITUATION

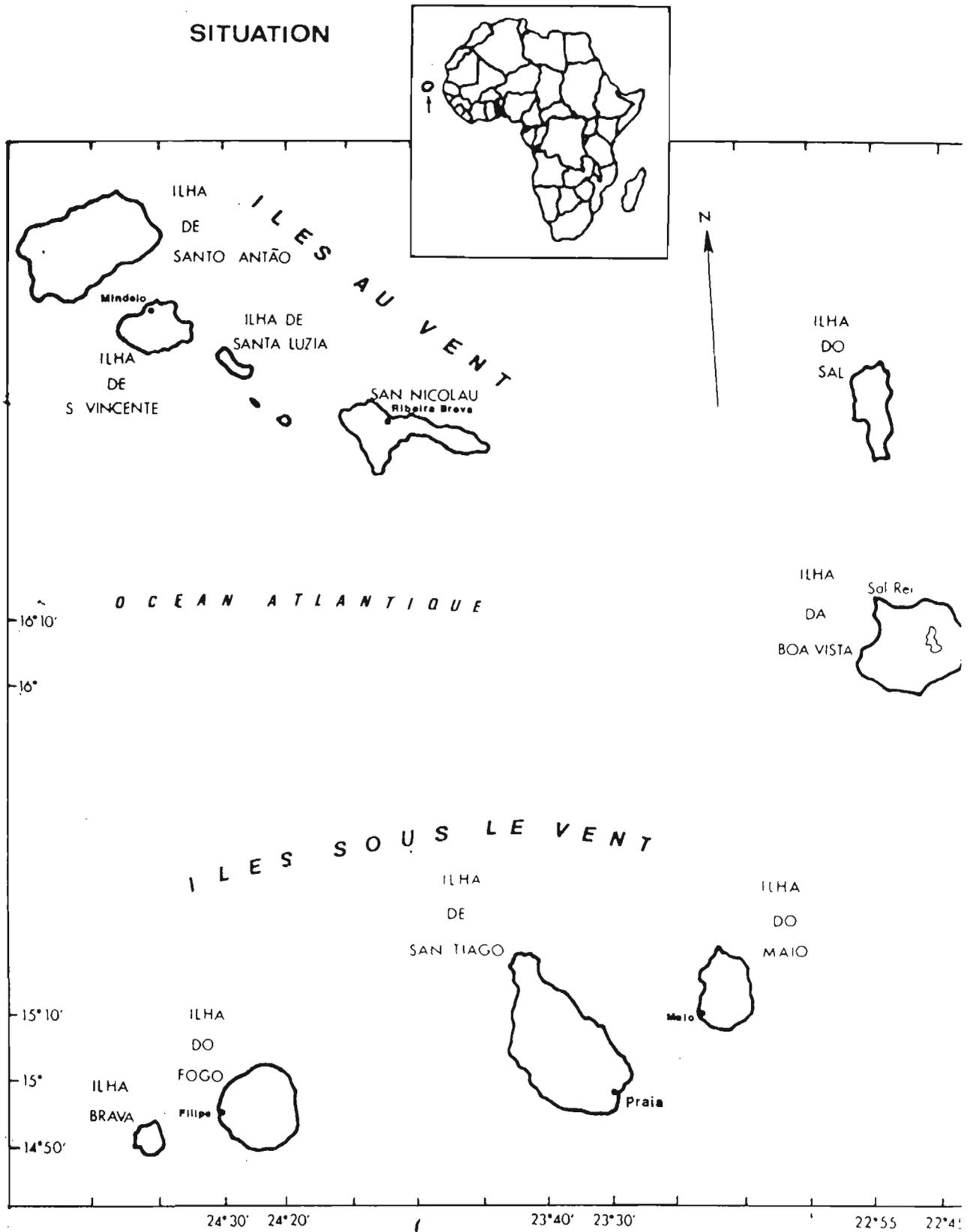


Fig-1-1

# L'ARCHIPEL DES ILES DU CAP-VERT

## 1 GENERALITES

L'Archipel des îles du Cap Vert doit son existence aux failles transformantes du rift atlantique qui le traversent ; celles-ci sont à l'origine d'épanchements volcaniques importants depuis la fin de l'ère secondaire ; le volcanisme s'est manifesté par des guyots sous-marins, puis des appareils aériens dont les formes actuelles, résiduelles ou récentes, constituent les terres émergées cap-verdiennes.

A cinq cents kilomètres à l'ouest des côtes du Sénégal et de Mauritanie, l'archipel des îles du Cap-Vert partage, avec ces pays et tous ceux de la bande sahélienne à semi-désertique du continent africain, des conditions climatologiques d'aridité liées à trois grands courants. Deux d'entre eux, l'alizé du Nord-Est et l'harmattan, sont dominants et responsables de cette aridité ; le troisième, la mousson atlantique, apporte avec plus ou moins de régularité, suivant les déplacements septentrionaux de la zone intertropicale de convergence (ZIC), les pluies de l'été

L'alizé du Nord-Est et le courant des Canaries ont conduit les navigateurs portugais du XV<sup>ème</sup> siècle vers l'archipel le plus méridional de la Macaronésie (comprenant aussi Açores, Madère, Salvages, Canaries) dont l'intérêt stratégique est vite apparu sur la route des Amériques et, en particulier, dans le commerce triangulaire de la traite des esclaves.

Parallèlement, un peuplement important s'est développé au cours des siècles. Les activités agricoles rendues vitales ont placé, dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle, au second rang les activités de traite, mais conduit rapidement à une surexploitation du milieu (déforestation due à l'homme et aux caprins) amenant une plus forte aridité et une dégradation des sols. Insouciance, incompétence et pauvreté des colonisateurs sont largement responsables de l'érosion, de la diminution des terres arables et de la désertification menaçante (Pélissier R., 1982) qui ont relégué l'agriculture locale à un niveau purement symbolique.

Dans ce milieu hostile, la survie des Cap-verdiens constitue depuis près de trois siècles, un perpétuel combat contre l'aridité et la famine ; l'émigration massive (souvent forcée sur São Thome et l'Angola du temps de l'empire lusitanien) en a souvent été le seul palliatif.

Le brassage des populations africaines et européennes dépasse le métissage des races ; un métissage socio-culturel (assez voisin dans les coutumes de celui rencontré au Nordeste Brésilien) ajoute à l'originalité cap-verdienne. Cette identité cap-verdienne forgée dans les difficultés d'existence, son "melting-pot", son "crioulo", ses "mornas" nostalgiques, le complexe de l'insularité et l'alternance de départs et retours de ses enfants, est la garantie de l'unité du pays. Elle estompe le souvenir d'anciennes rivalités entre îles, tout en laissant au cœur des populations un grand attachement à l'île natale.

Cette unité est également évidente dans le milieu physique, malgré de nombreuses disparités entre îles. Il nous a paru important d'en définir les principaux aspects avant d'aborder plus précisément à São Nicolau les problèmes posés dans nos études.

## 2 APERCU GEOGRAPHIQUE

L'archipel des îles du Cap-Vert est compris entre : 13°50 et 17°15 de latitude nord  
22°45 et 25°25 de longitude ouest.

Il comprend neuf îles principales habitées et neuf îlots secondaires totalisant 4033 km<sup>2</sup>. Cette superficie ne représente que 5% de la superficie du cercle circonscrit à l'archipel. Santo Antão est l'île la plus septentrionale et la plus occidentale de l'Archipel ; la plus méridionale est Brava ; la plus orientale est Boa Vista.

Les îles sont, par ordre de grandeur : Santiago, Santo Antão, Boa Vista, Fogo, São Nicolau, Maio, São Vicente, Sal et Brava.

Les îles et îlots secondaires sont : Santa Luzia, Branco et Raso entre São Vicente et São Nicolau, et les trois îlots de Rombo entre Fogo et Brava.

Le plus grand axe de l'archipel a environ 300 km (entre Santiago et Santo Antão).

L'archipel comprend deux groupes d'îles :

- un groupe Nord dit "Barlavento" ou îles au vent, comprenant Santo Antão, São

Vicente, São Nicolau, Sal et Boa Vista, bien exposées aux alizés du Nord Est.

- Un groupe Sud dit "Sotavento" où îles sous le vent, comprenant Brava, Fogo, Santiago et Maio.

D'autres distinctions peuvent être faites. Ainsi, on relève trois alignements principaux :

- à l'est, un alignement Nord-Sud comprenant Maio, Boa Vista et Sal,
- au Nord, un alignement WNW-ESE comprenant Santo Antão, São Vicente, São Nicolau et Boa Vista,
- au sud, un alignement WSW-ENE comprenant Brava, Fogo, Santiago et Maio.

On peut distinguer aussi le groupe d'îles basses ou sans relief très marqué de l'axe oriental Nord-Sud avec Maio, Boa Vista et Sal, et le groupe d'îles hautes du Nord et du Sud, à l'ouest du 7<sup>ème</sup> groupe dont São Nicolau, Santo Antão et Santiago ont les reliefs anciens les plus élevés et dont Fogo avec son volcan actif constitue le point culminant de l'archipel à 2 829 m.

Si l'on excepte les îles basses de l'Est où les élévations ne dépassent pas 406 m à Sal, 390 m à Boa Vista et 436 m à Maio, un relief tourmenté constitue la règle pour les îles hautes et est dû aux formations volcaniques. Celles-ci induisent des pics ou necks (culots de lave), des filons (dykes) ; les pentes sont très fortes ; de très hautes falaises peuvent dominer la mer comme celle de la Rocha Escrita près de

Ribeira Prata à São Nicolau qui fait 700 m de hauteur.

A ces reliefs tourmentés peuvent succéder des plateaux basaltiques inclinés en pente assez douce vers la mer (mésas). Parfois comme à Praia de telles surfaces évoquent des surfaces d'érosion anciennes ou même des phases d'immersion.

A l'intérieur, ces plateaux -ou achadas- sont entaillés par les ribeiras (1) qui ont pu y creuser de véritables canyons plus ou moins étroits et profonds. Lorsque les ribeiras atteignent leur niveau de base, les sources sont souvent présentes et le fond de vallée devient un jardin, une oasis (Cidade Velha à Santiago par exemple).

Mais les formes du relief sont très variées. La grande Caldeira de Fogo, avec son volcan emboîté et ses champs de lave en sont un exemple ; les flancs déchiquetés des vieux volcans des autres îles en sont un autre.

Les principaux massifs montagneux sont :

- à Santiago, le Pico de Antonia : 1394 m
- la Sierra de Malagueta : 1063 m
- à Santo Antão : le Tojo do Coroa : 1979 m
- à São Nicolau : le Monte Gordo : 1312 m
- à São Vicente, le Monte Verde : 774 m
- à Brava : le Pico de Fontainhas : 976 m
- à Fogo : le Pico de Fogo déjà cité : 2829 m

Dans le tableau 1.1 on a indiqué pour chaque île, la superficie, le nombre d'habitants et la densité de population.

Tableau 1.1. : Superficie, Population et Densité des îles du Cap Vert

	Superficie km <sup>2</sup>	Population 1979	Densité hab km <sup>-2</sup>
<b>BARLAVENCO</b>			
Santo Antao	779	45 000	58
Sao Vicente	227	40 000	175
Sao Nicolau	343	12 600	
Santa Lucia, Bramo, Rojo	45	0	
Sal	216	5 400	25
Boa Vista	620	2 700	4,4
<b>QTAVENTO</b>			
Santiago	991	133 000	134
Maio	269	3 700	13,7
Fogo	476	27 000	56
Brava	67	7 000	104
TOTAL	4033	276 400	68,3

(1) d'autres informations parlent de 16 000 habitants soit 47 hab km<sup>2</sup>

On relève que pour une superficie globale de 4 033 km<sup>2</sup>, la population dénombrée en 1979 était de 276.400 habitants soit une densité de 68,3 habitants par kilomètre carré.

A elle seule, Santiago accueille près de la moitié de la population totale (133.000 habitants dont plus de 2/3 sont dans l'orbite de Praia) avec une densité de 134 habitants.km<sup>-2</sup>.

Un autre pôle de forte densité de population se situe à São Vicente autour du pont de Mindelo (175 habitants.km<sup>-2</sup>)

Les îles basses sont les moins peuplées ; les îles hautes à vocation exclusivement agricole ont une densité de l'ordre de 50 habitants.km<sup>-2</sup>.

Le taux de natalité reste très élevé avec une valeur de 34 ‰. La constante poussée démographique a eu d'évidentes conséquences sur le milieu.

(1) Appellation des torrents et rivières (pérennes ou non)

- extension des surfaces cultivées sans politique d'utilisation rationnelle des terres.
- déboisement quasi total
- mise en culture des terres en pente, très dangereuse pour la conservation des sols.

On estime la population cap-verdienne émigrée entre 300 et 350.000 personnes, dont la répartition serait la suivante :

- 200 à 250.000 aux U.S.A.
- 50.000 au Portugal
- 25.000 au Sénégal
- 25.000 en France, aux Pays Bas et en Italie.

Sur le plan économique, la population se répartit pour 90% dans le secteur primaire, 2% dans le secteur secondaire et 8% dans le secteur tertiaire.

80% de la population est liée à l'agriculture qui porte sur 50 à 60.000 hectares de cultures non irriguées pour 900 hectares de cultures irriguées en 1979 (Pélissier, 1982) C'est dire l'incidence sur les revenus de ces populations de récoltes perdues du fait de la sécheresse. Les méthodes de culture sont généralement archaïques et les productions très faibles. La

culture du maïs couvre à peine le dixième des besoins. Les exportations de cultures industrielles (poussière et café) sont en baisse. Seule la production bananière est en progrès du fait de l'irrigation. La pêche et ses dérivés (conserveries, salaisons) commencent à se développer. L'artisanat a presque complètement disparu et l'industrie en est encore à ses premiers balbutiements.

A lui seul l'aéroport international de Sal contribue autant que toutes les exportations aux rentrées de devises... mais ce pactole tient pour beaucoup à l'escala technique que constitue Sal pour les longs courriers d'Europe vers l'hémisphère Sud qui est de plus en plus "sautée" aujourd'hui. Reste le trafic extérieur cap-verdien très important du fait de sa population émigrée. Cette population émigrée est aussi un atout dans l'économie des îles puisqu'elle ramène au pays bon an mal an 7 fois plus de devises que les valeurs d'exportation.

On conçoit que de tels problèmes économiques ne trouvent pas facilement leurs solutions du jour au lendemain. Les choix politiques doivent s'appuyer sur les contraintes énormes qu'impose le milieu physique de l'archipel ; il est rare qu'un peuplement aussi important ait eu à supporter des conditions naturelles aussi difficiles.

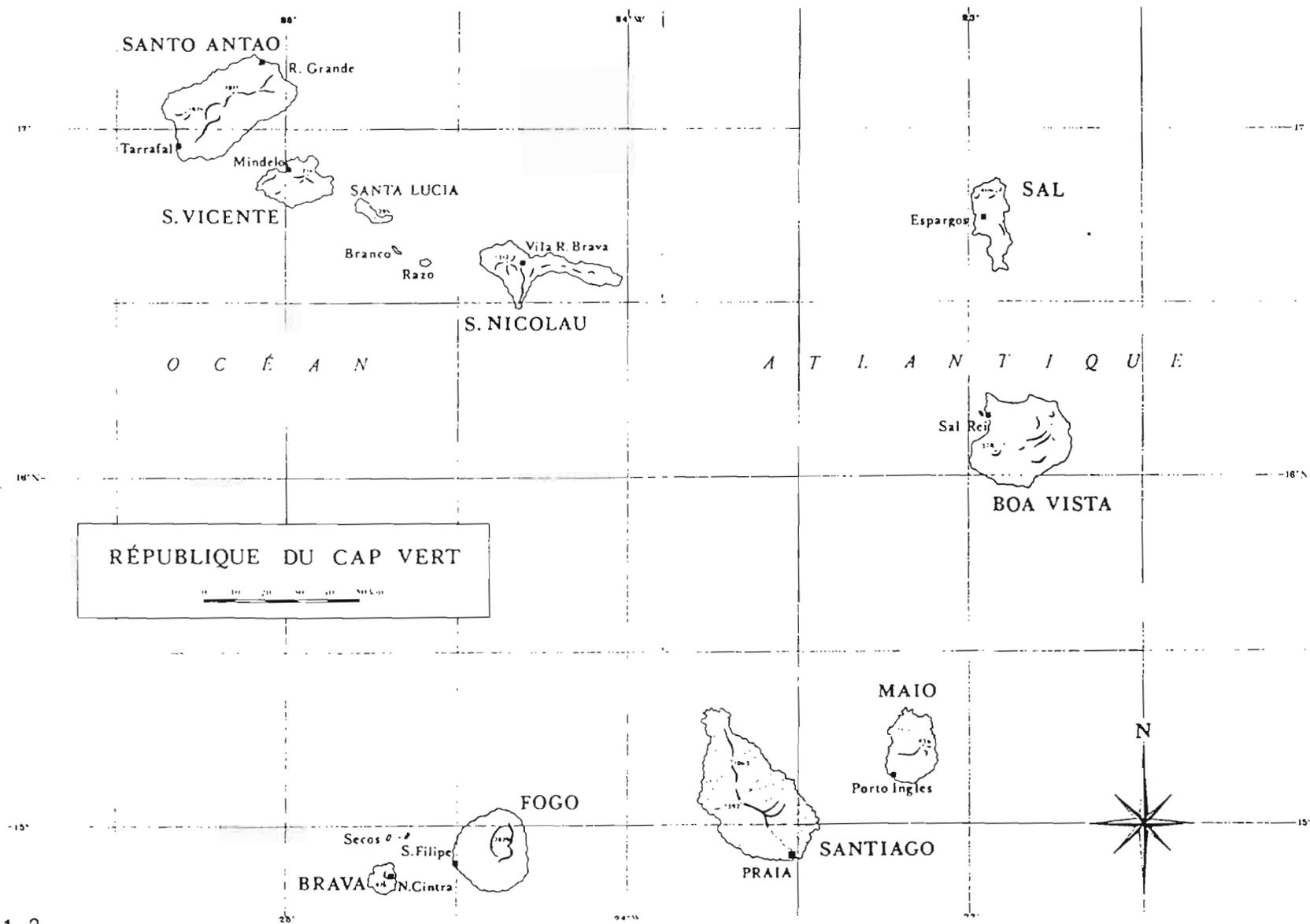


Fig. 1-2

### 3 GEOLOGIE DE L'ARCHIPEL DU CAP-VERT

#### 3.1 LES ORIGINES

L'océan atlantique s'est ouvert entre 200 et 180 millions d'années (MA) avant l'époque actuelle, des Pyrénées au Labrador dans sa partie nord, par un océan transversal, prolongement de la Thétys qui séparait déjà l'Eurasie du Gondwana africain. Entre 180 et 130 MA, bien que l'Amérique du Sud et l'Afrique restent encore solidaires, un premier segment de l'Atlantique proprement dit s'ouvre entre l'Espagne et la Sierra Léone. De 130 à 85 MA, l'Atlantique médian continue à s'ouvrir et l'Amérique du Sud se sépare de l'Afrique. Depuis cette époque, le mouvement de l'Europe vers le Sud-Est a entraîné l'orogénèse alpine et des manifestations volcaniques dans la partie océanique au contact des plaques. La tectonique des plaques explique ainsi la naissance d'un océan. Les forages profonds confirment que les sédiments des plaines abyssales remontent au pied des escarpements continentaux à un âge jurassique.

La dorsale médioatlantique est formée de deux chaînes parallèles encadrant un fossé axial, le rift, par lequel des roches profondes issues du manteau remontent, provoquant un élargissement progressif de l'océan.

La vitesse de cet élargissement est très variable (généralement comprise entre 1 et 5 cm par an) et cette variabilité suivant les zones expliquent les fracturations transverses.

Les reliefs de la dorsale médioatlantique disparaissent, lorsque l'on se rapproche des continents, sous les sédiments pélagiques (collines abyssales et plaines abyssales) et on admet qu'il faut à peu près 40 millions d'années pour que ceux-ci atteignent l'épaisseur de 800 mètres nécessaire pour masquer les variations de relief de la croûte océanique.

Dans tout cela, nous l'avons indiqué plus haut, l'Archipel du Cap-Vert résulte des épanchements volcaniques issus de failles transformantes plus ou moins cicatrisées aujourd'hui. Ces zones de fractures transverses jouant en compression modérée ont donné ici naissance à des cônes volcaniques explosifs groupés en massif à l'intérieur duquel des alignements ont été identifiés. La cicatrisation paraît d'autant plus avancée que l'on est éloigné du rift médioatlantique ; cela expliquerait que Fogo soit le seul volcan encore en activité dans l'Archipel par sa position occidentale relativement proche de la faille de la Vema (dont la prolongation pourrait aller jusqu'au Sénégal par le Canyon sous-marin de Cayar et expliquer le volcanisme ancien de Dakar)

#### 3.2 L'HISTOIRE GEOLOGIQUE

1/ Les séries les plus anciennes de l'Archipel sont très probablement des calcaires jurassiques et crétacés affleurant dans l'île de Maio. Certains auteurs ont cru voir des traces du vieux socle (gneiss, diorites, syénites et gabbros) mais leurs observations n'ont pas été confirmées.

Le Jurassique et le Crétacé identifiés dans l'île de Maio semblent bien indiquer le caractère plus ancien des îles basses de l'est (de Maio à Sal). R. STAHLECKER (1929) a reconnu dans la faune fossile d'une série de 400 m de calcaires, marnes et argiles, un horizon de 100 m daté du Barrémien, puis 10 m d'Aptien et probablement de Néocomien. Deux horizons basaltiques se sont déjà intercalés dans l'ensemble de la série (avant le Barrémien et après l'Aptien). Une lacune importante se produit à la suite des plissements de cette série. A l'exclusion de ces reliques connues, tout le sédimentaire ancien s'efface devant une intense activité volcanique qui va être très longue et diversifiée. On retrouve à Brava et Fogo quelques calcaires cristallisés par métamorphisme à l'intérieur de basaltes.

- 2/ La grande phase éruptive va s'étendre du Crétacé à l'Eocène ; elle a permis la mise en place de l'ossature interne de chaque île. Ce complexe éruptif ancien (CA) est identifié au coeur de chaque île par des affleurements ayant subi une très forte altération ; la série est caractérisée par l'importance des roches intrusives granulaires et un grand nombre de filons syntectoniques.
- 3/ Puis survient une longue phase d'érosion qui précèdera une reprise à l'ère tertiaire de l'activité volcanique. Les travaux de SERRALHERO et LOURDES UBALDO (1979) sur des calcarénites de Campo da Preguiça

dans l'île de São Nicolau, basés sur l'étude des foraminifères, montrent que ces sédiments reposent toujours sur le complexe ancien (CA) et sont recouverts par des coulées de laves sous-marines anciennes.

L'identification des foraminifères planctoniques permet de dater cette phase intermédiaire d'érosion au Miocène supérieur.

Ainsi, durant une longue période d'inactivité volcanique les îles du Cap-Vert ont été soumises à une intense action érosive qui a atteint les niveaux profonds des anciens appareils volcaniques constitués pour l'essentiel de basaltes et roches granulaires.

Pour A. Chevalier (1935), l'existence de rivages marins dès le Miocène est indubitable. SERRALHERO (*op. cit.*) note que des plages identiques à celles que nous connaissons ont eu leur sédimentation interrompue pendant une phase d'immersion importante (de 450 à 250 m sous le niveau actuel de l'océan) par d'abondantes coulées sous-marines anciennes. Celles-ci sont certainement liées à la reprise de l'activité volcanique de la plaque africaine à la fin de l'Oligocène vers -25 MA (Burke et Wilson, 1972), mais observées avec un décalage : au Miocène moyen à Maio, au Miocène supérieur à São Nicolau.

- 4/ Cette reprise de l'activité volcanique au Miocène va se poursuivre au Pliocène. Elle

va d'abord se manifester par des émissions essentiellement explosives (abondance des produits clastiques), avec les brèches sous-marines de la série Flamengos et des brèches volcaniques continentales.

Ensuite sans discontinuité importante, si ce n'est des périodes de ferralitisations identifiées par des sols fossiles rouges intercalés dans les coulées, on a une succession de séries volcaniques que l'on a rassemblées sous le nom de série intermédiaire. On y distingue une partie inférieure marquée par la permanence du dynamisme explosif (hypoclastes, brèches et phonolites), puis une phase marine avec pillows-lavas, tufs et pyroclastes (LRi) traduisant la poursuite au Miocène supérieur de phases d'immersion et d'émergence. La phase finale essentiellement Pliocène donne naissance à une très épaisse succession de coulées aériennes essentiellement basaltiques. Épaisses de plusieurs centaines de mètres, ces coulées forment les falaises et reliefs aigus des îles hautes si caractéristiques à São Nicolau. Durant cette phase il y a aussi formation des grandes structures de strato-volcans.

- 5/ Le Pliocène s'achève par de puissantes coulées basaltiques discordantes sur les séries précédentes.
- 6/ Au quaternaire, on observe encore des émissions diffuses où les pyroclastes prédominent ; des coulées de lave

vacuolaires et scoriacées leur sont souvent associées ; à Fogo, les successions de laves basaltiques scoriacées sont toujours actuelles. Les dernières coulées ont eu lieu en 1817, 1847, 1852, 1857 puis 1951 et un "réveil" s'est manifesté par des séismes à Brava en 1982.

En dehors du volcanisme, signalons quelques dépôts alluviaux dans quelques vallées de Santiago ou Santo Antão.

En résumé, l'histoire géologique des îles du Cap-Vert (BURGEAP, 1974) tient essentiellement dans :

- une phase volcanique du Crétacé à l'Eocène ayant formé le complexe ancien ;
- après une période d'érosion, au Miocène moyen et supérieur, une nouvelle phase volcanique en partie sous-marine (série des Flamengos) ;
- une longue succession de coulées du Miocène supérieur au Pliocène donnant la série intermédiaire ;
- les séries récentes du Pliocène et du quaternaire (coulées basaltiques et émissions pyroclastiques).

Dans l'étude de São Nicolau, les caractéristiques de ces séries seront précisées sur le plan de leur potentialités hydrogéologiques.

### 3.3 DESCRIPTION GEOLOGIQUE ET HYDRO-GEOLOGIQUE DES DIFFERENTES SERIES

Nous empruntons à l'ouvrage du BURGEAP (1974) la description géologique proposée ci-après :

#### 3.3.1 Complexe éruptif interne ancien (CA)

Les roches intrusives granulaires sont de types variés : gabbros (Santiago), syénites (Boa Vista et Brava), essexites (Maio), quelques filons de carbonatites (Santiago, Fogo, Brava, São Vicente). Ces intrusions plutoniques sont particulièrement développées à Maio et Boa Vista.

La densité des filons est souvent telle qu'ils arrivent à constituer plus de 50% de l'ensemble des roches. Ils détruisent toute trace des anciennes structures ; c'est ainsi qu'on ne retrouve pratiquement plus de coulées. Ces filons d'orientation multiples, presque toujours verticaux, d'épaisseur variable de quelques dizaines de centimètres à 2 mètres et plus, sont en majorité basaltiques.

Ces filons appartiennent en général à cette formation elle-même : ceux qui paraissent en liaison avec des émissions plus tardives semblent exceptionnels.

La matrice interfilonienne est constituée de basalte plus ou moins altéré, de brèches, et plus rarement de tufs.

Les pointements phonolitiques souvent très altérés en affleurement, mais très peu perméables dans leur masse, sont nombreux.

De par la forte altération de surface, cette série est peu perméable à l'affleurement. Par contre, les niveaux altérés qui atteignent de 5 à 10 m d'épaisseur, ont un coefficient de porosité élevé (5 à 10% et plus).

De nombreux puits, notamment à Santiago, ont été creusés dans cette série. Bien que ne traversant pas toute la zone d'altération et ne pénétrant que de quelques mètres sous le niveau phréatique, ces puits ont en général une capacité de production comprise entre 5 et 15 m<sup>3</sup> par jour. Exceptionnellement, ces puits permettent une extraction de 20, voire 40m<sup>3</sup>/j. lorsqu'ils drainent une petite nappe alluviale au toit du CA.

Les forages réalisés à Santiago ont montré que les niveaux productifs principaux étaient situés au toit de la roche saine en relation avec une zone de fracturation, dont l'épaisseur ne semble pas excéder 10 à 20 mètres. Au-delà d'une trentaine de mètres de profondeur, la roche devient très compacte et pratiquement improductive.

La productivité de ces forages est uniformément comprise entre 2 et 7 m<sup>3</sup>/h, permettant une exploitation de 30 à 100 m<sup>3</sup>/j.

Le complexe de base, CA, tout au moins pour les zones basaltiques, riches en filons, apparaît remarquablement homogène.

Une exception doit être faite pour les captages recoupant en profondeur des filons importants, de roche saine, probablement postérieurs au CA qui forment drain : les débits horaires peuvent alors atteindre 15 et même 25 m<sup>3</sup>/h., la capacité journalière 100 à 200 m<sup>3</sup>/jour.

Seuls les pointements phonolitiques et les zones de tufs (Rib. de São Tomé) semblent être totalement stériles.

Pour les roches granulaires, seuls les niveaux d'altération semblent devoir être productifs. L'existence d'une fracturation en profondeur reste à démontrer.

### **3.3.2. Les brèches de la base du Miocène (séries de Flamengos et des Orgaos = FL et CB)**

Les brèches marines ont des caractéristiques qui dépendent essentiellement de leur pourcentage de pillow-lavas. Lorsque les débris hyaloclastiques prédominent, la perméabilité et la productivité de ce type de formation paraissent voisines de celle du CA. La porosité doit être par contre plus élevée, surtout en profondeur. Quand les pillow-lavas abondent, ils sont souvent très compacts et on ne peut espérer une productivité beaucoup plus forte ; la porosité, elle, est plus faible.

Comme pour le CA, les zones de tufs sous-marins sont stériles.

Les formations bréchiqes continentales (CB) ont également une productivité voisine du CA, parfois plus élevée. La porosité est nettement plus forte. L'altération de surface est très peu perméable (au point de mettre en charge parfois les niveaux inférieurs : forage artésien FT 19). Les tufs et les filons jouent le même rôle que dans le CA (tufs = réservoir, filon = drain).

Les brèches épicalstiques se présentent sous l'aspect de conglomérat bréchiqle le plus souvent très cimenté et n'ont plus alors qu'une perméabilité de fissure très réduite. Elles sont pratiquement imperméables.

### **3.3.3 Base de la série intermédiaire (Mi, Ci)**

Les produits pyroclastiques contenus dans ces formations sont presque toujours altérés et très cimentés, et les coulées de lave compactes et peu fracturées. L'ensemble est peu perméable et se comporte sensiblement comme le CA. C'est le cas du "complexe inférieur filonien", à Santo Antão et S. Vicente, et de la base de la série du Pic d'Antonia à Santiago, au moins dans la partie centrale.

Quant aux formations phonolitiques, elles sont en général peu perméables. Les pyroclastes phonolitiques rapidement altérés et facilement cimentés le sont très peu, de même que les intrusions phonolitiques en dôme ; les coulées doivent être plus fracturées.

### 3.3.4 Pillow-lavas de la série inter-médiaire (LRi, LRs)

Ces pillow-lavas sont remarquablement conservés (Cidade Velha). Leur porosité et leur perméabilité est extrêmement élevée. Ce sont les aquifères de plus forte productivité de l'archipel : à 35 m<sup>3</sup>/h les rabattements peuvent n'être que de quelques centimètres.

Cette productivité diminue fortement là où le pourcentage en pyroclastes augmente, et avec l'apparition des tufs.

Il est à noter qu'à l'approche du rivage actuel, les hyaloclastes subissent des réactions secondaires, avec notamment formation de calcite. Il en résulte une cimentation secondaire de la roche, ce qui joue un rôle hydrogéologique très favorable en diminuant certainement l'invasion marine.

### 3.3.5 Les coulées de la série inter-médiaire (PA, M)

Ces coulées, épaisses le plus souvent de quelques mètres, sont très régulières. leur fracturation essentiellement verticale doit entraîner une porosité comprise, le plus souvent, entre 1 et 2%, mais qui doit parfois s'élever à 4 ou 5% pour certains basaltes bulleux ou pour les coulées moins épaisses et plus pentues, qui sont alors plus fracturées.

Entre chaque coulée suivant le schéma habituel, on a :

- un niveau généralement peu perméable constitué par d'anciens sols, des alluvions, des dépôts pyroclastiques le plus souvent fins, compacts et altérés.
- un niveau de brèche de base de coulée, de perméabilité et de porosité nettement plus élevées que celles de l'ensemble de la formation, mais dont l'épaisseur et l'extension sont très variables.

La porosité de l'ensemble doit être, en moyenne, au moins égale à 2%.

La perméabilité moyenne doit être assez faible (comprise entre 10<sup>-5</sup> et 10<sup>-6</sup> m/s<sup>-1</sup>).

### 3.3.6 Dernières grandes coulées : (A)

On pourrait regrouper dans cette série quelques dernières coulées rattachées parfois à la série précédente, et les grandes coulées de la fin du Pliocène de Santiago (Formation d'Assomada).

Ces coulées discordantes sur les précédentes, sont en général plus épaisses, et se débitent en orgues. Leur coefficient d'emmagasinement et leur perméabilité sont probablement analogues, voire plus faibles que celles des basaltes de la série précédente. Par contre, elles sont caractérisées par des brèches de base beaucoup plus développées et grossières, qui constituent d'importants chenaux de circulation préférentielle.

### 3.3.7 La série récente (MV)

Elle est avant tout caractérisée par des roches de très fortes perméabilité et porosité : laves scoriacées, brèches, lapillis.

Ces formations sont en général dénoyées, sauf dans le cas de quelques coulées comblant quelques vallées fossiles (Faja de São Nicolau) et de massifs pyroclastiques, lorsqu'ils reposent sur des tufs cimentés (Mte Gordo à São Nicolau). Leurs très fortes porosités (jusqu'à plus de 20% pour des laves scoriacées et de 40% pour les lapillis) peuvent alors en faire de bons réservoirs.

### 3.3.8 Alluvions

Là où les alluvions ont une extension assez grande, à Santo Antão et Santiago, elles sont presque toujours grossières, propres, au moins à leur base. Les niveaux les plus récents sont plus sableux et même silteux.

Il en résulte une perméabilité extrêmement forte, qui reste élevée même dans les niveaux de surface, aux sédiments plus fins, favorisant ainsi l'infiltration des ruissellements.

La propreté de ces sédiments peut paraître paradoxale lorsqu'on sait que les eaux de crues sont extrêmement chargées en produits argileux résidus de l'altération de basalte. En fait, la structure des argiles (1) d'origine basaltique doit être caractérisée par une forte dispersion. Flocculant très mal, elles ne peuvent

pas sédimenter au cours d'écoulements superficiels très rapides.

Les alluvions sont toutefois plus argileuses lorsqu'elles correspondent à des bassins versants composés essentiellement du complexe ancien, ou peu arrosés (ces deux facteurs étant généralement associés, dans la mesure où le complexe ancien ne donne pas lieu à des reliefs importants nécessaires à l'obtention de précipitations élevées). Dans ce cas, il est probable que les argiles, plus calciques (les eaux du CA sont assez dures) flocculent plus facilement (2).

### 3.3.9 Schéma hydrogéologique général

Il peut se résumer aux trois ensembles identifiés par le BURGEAP (1974) et décrits ci-après :

#### - La série de base (CA, CB, FL, Ci)

Les formations volcaniques les plus anciennes, CA, brèches Miocènes, et le "complexe inférieur filonien" de Santo Antão et S. Vicente, sont caractérisés par une forte altération en affleurement, expliquant ainsi les pentes moins accusées que celles rencontrées dans les séries postérieures. Elles correspondent à une coupure géomorphologique nette.

-----  
(1) Avant nos mesures d'érosion à São Nicolau, on a attribué à tort une forte résistance de ces sols à l'érosion

(2) Par contre, nous avons vérifié cette hypothèse qui implique que les affleurements du complexe ancien (CA) sont plus sensibles à l'érosion que ceux dérivés de formations récentes.

Ce sont des formations à forte compacité (en liaison avec le grand nombre de filons qui les recoupent et l'épaisseur des terrains qui les ont recouvertes au cours de l'histoire). Cette série est cependant généralement aquifère. Si le coefficient d'emmagasinement peut varier d'une formation à l'autre (plus élevé dans les brèches aériennes ou marines que dans le CA, du moins hors de la zone d'altération) leur perméabilité, réduite par rapport aux formations plus récentes, est assez uniforme et leur donne une bonne homogénéité d'ensemble.

Du fait de leur perméabilité réduite, ces diverses formations constituent le substratum des principales sources de l'archipel.

Ainsi, toutes ces formations peuvent être regroupées, du point de vue hydrogéologique, sous le terme de série de base.

Notons en outre, que par suite de l'altération généralisée des affleurements de la série de base, la capacité d'infiltration y est assez réduite (sauf peut-être à Maio, cf. ci-après).

- La série intermédiaire (Mi, LRi, LRs, PA, M).

La conjonction de divers facteurs fait de cette série le principal réservoir aquifère de l'archipel :

- sa forte épaisseur
- un coefficient d'emmagasinement relativement élevé : 2% (qui reste important, au moins face au cœur non

altéré du complexe ancien, très compact).

- Une perméabilité assez réduite, qui évite une vidange trop rapide des réserves, malgré une forte pente générale des coulées et du substratum.

Des gradients hydrauliques très élevés sont rendus possibles, permettant la constitution de réserves importantes, bien que les reliefs très accusés soient morcelés et profondément entaillés par de nombreuses vallées. Il en résulte également une régularisation des ressources, exceptionnelle vu la faible extension des réservoirs : le débit des exutoires varie très peu après plusieurs années de sécheresse presque totale.

- enfin, un taux d'alimentation élevé, puisque cette série correspond aux reliefs les plus élevés et les plus arrosés.

#### La série récente (A, MV)

Elle est caractérisée avant tout par une perméabilité forte, parfois très élevée. Les affleurements de laves scoriacées et de pyroclastes constituent des zones privilégiées d'infiltration, sur lesquelles le ruissellement est extrêmement réduit, alors que, s'étendant sur les plus hauts reliefs, elles sont généralement très arrosées.

Par contre, du fait d'une perméabilité très forte, cette série sera le plus souvent dénoyée, drainée par les niveaux sous-jacents.

### Les formations drainantes

Elles sont constituées par les pillow-lavas de la base de la série intermédiaire (à Santiago essentiellement, où elles ceinturent presque

toute l'île), par les alluvions quand elles sont assez épaisses, et, de façon plus erratique par les brèches de base des dernières grandes coulées.

## 4 LES TRAITS PRINCIPAUX DU CLIMAT

Le milieu des îles du Cap-Vert est fondamentalement marqué par les caractéristiques d'aridité de son climat. Ce climat compte parmi ses facteurs les plus représentatifs :

- l'irrégularité des précipitations d'une année à l'autre (répartition aléatoire dans la saison de juillet à octobre principalement, petit nombre de jours de pluie, faibles hauteurs de précipitation annuelle).
- les périodes répétées de sécheresse qui jalonnent l'histoire du pays d'autant de dramatiques famines ;
- la violence de certaines averses, aussi abondantes que brèves dans le temps, dévastant cultures et infrastructures ;
- la permanence pendant une grande partie de l'année des vents du Nord-Est ;
- la variabilité climatique entre versants exposés au vent ou sous le vent ; cette exposition se traduit par l'aridité totale ou une humidité relative.

La position de l'archipel par 24°W et 16°N au coeur de l'Atlantique n'est évidemment pas étrangère à ces conditions climatiques particulières dont nous rappelons maintenant les mécanismes généraux.

### 4.1 LES MECANISMES DU CLIMAT

La zone intertropicale est caractérisée par une région équatoriale de basses pressions relatives encadrée par deux ceintures anticycloniques subtropicales Nord et Sud isolant pratiquement le monde intertropical des régions tempérées.

Ces hautes pressions subtropicales situées vers les 30<sup>èmes</sup> parallèles, divisant le globe en deux surfaces égales, ont été assimilées à des barrières qui restent toutefois discontinues puisqu'elles sont constituées de chapelets de cellules anticycloniques. Celles-ci occupent de préférence la partie Est des océans. Chaque cellule anticyclonique se présente comme une vaste ellipse dont le grand axe a de 2 500 à 4 000 km de longueur et est orienté WSW-ENE dans l'hémisphère Nord, WNW-ESE dans l'hémisphère Sud. En surface, les pressions les plus fortes sont observées sur le front polaire de la cellule, alors qu'en altitude elles se décalent au contraire vers l'Equateur.

Entre ces deux zones de hautes pressions s'établit un grand flux Est soufflant vers la zone de basses pressions. Ce grand flux d'Est est l'homologue pour les basses latitudes du flux d'Ouest des Westerlies des moyennes latitudes ; il peut même prendre l'allure d'un courant jet (ou jet-stream) en altitude.

Il est matérialisé par les alizés. Les alizés des deux hémisphères convergent dans la région équatoriale, déterminant la zone de convergence intertropicale ou ZCIT.

Cette ZCIT subit un déplacement annuel en direction de l'hémisphère concerné par la saison d'été. Elle est aussi le siège de phénomènes d'ascendance plus ou moins généralisés. L'air, qui s'élève dans la troposphère, retourne vers les deux hémisphères et contribue à alimenter les anticyclones subtropicaux. De chaque côté de la ZCIT, il y a donc formation de deux cellules tournant dans un plan méridien, appelées cellules de Hadley.

En zone intertropicale, l'évolution du cycle (évaporation-condensation-précipitation) est liée à la circulation des cellules de Hadley.

Dans les zones anticycloniques subtropicales, le bilan énergétique solaire est très élevé, d'une part du fait de l'incidence des rayons du soleil, d'autre part, du fait de la limpidité de l'air sec. Ceci entraîne une très forte évaporation, qui explique qu'à ces zones anticycloniques correspondent sur le continent régions arides et déserts. Les masses d'air provenant des alizés continentaux seront donc très sèches.

Lorsque les alizés survolent les océans, ils s'enrichissent en  $H_2O$  et entraînent vers la ZCIT une grande quantité de vapeur d'eau et, sous forme de chaleur latente restituée au moment de la condensation, une part importante de l'énergie solaire advectée dans les zones anticycloniques subtropicales.

Cet alizé chargé d'humidité prend le nom de mousson lorsqu'il franchit l'Equateur et que sa

direction passe au Sud-Ouest par suite de la force de Coriolis.

La convergence des deux masses d'air sec et humide, entre Harmattan (Alizé du N-E) et Mousson (alizés du S-W), détermine sur le continent une zone de contact étroite qu'on a pu légitimement appeler Front. C'est le Front Intertropical ou FIT.

Sur l'Afrique en été, la zone des basses pressions intertropicales migre en surface sur la partie Sud du Sahara ou l'échauffement du sol crée une relative dépression dans les basses couches ; mais les hautes pressions réapparaissent en altitude du fait de la permanence des phénomènes de subsidence de l'air. La dépression de surface attire le flux de mousson qui s'enfonce en coin sous l'air subsident.

De fait, les mécanismes climatiques, de la zone intertropicale sont beaucoup plus complexes ; dans le détail, les météorologues ont mis en évidence l'importance des faits dynamiques et plus particulièrement cinématiques, des transferts énergétiques et des courants-jets d'Est (Jet tropical d'Est à 14, 15 000 m et jet Africain d'Est à 5 000 m).

Pour désuètes que paraissent les notions de masses d'air et de front, elles n'en expliquent pas moins les variations climatiques saisonnières observées dans le pays suivant le schéma simple proposé par M. Genieux (1958) et que nous rappelons ci-après.



Page précédente :

Cliché Météosat II communiqué par la Météorologie Nationale (Centre de Météorologie Spatiale de Lannion) pris sur l'Afrique de l'Ouest le 9 octobre 1987 à 12h TU dans le canal visible.

- L'archipel s'identifie facilement au large du Sénégal (presqu'île du Cap-Vert).

Le climat se trouve sous la dépendance étroite de deux centres d'actions :

- Au sud, l'anticyclone de Sainte Hélène débordant largement au Nord de l'Equateur pendant l'été boréal génère les alizés du Sud-Est détournés en flux de mousson du Sud-Ouest dans l'hémisphère Nord.
- Au Nord, l'anticyclone des Açores, relayé à l'Est par une cellule anticyclonique égypto-libyenne pendant l'hiver boréal, génère les alizés du Nord-Est et l'Harmattan. Elle devient zone de basses pressions en été et est appelée dépression thermique saharienne.

Ces deux centres d'actions aboutissent à la convergence de deux masses d'air complètement différentes ;

- l'air continental stable et très sec, au Nord ;
- l'air maritime instable et humide, au Sud.

La limite de ces deux masses d'air s'appelle, on l'a dit, le Front Intertropical, FIT. La surface frontale est très inclinée vers le Sud, de sorte que la mousson - dont l'épaisseur maxima dépasse rarement 3 000 m- s'avance en coin sous l'Harmattan. Aux niveaux supérieurs, un courant d'Est surmonte Mousson et Harmattan.

Le FIT se déplace au cours de l'année, restant sensiblement dirigé le long des parallèles. Il suit, avec une amplitude différente et environ un mois de retard, le mouvement en déclinaison du soleil. Ses positions extrêmes sont, en moyenne, le vingtième parallèle Nord en juillet (la dépression saharienne, très creuse, et l'anticyclone austral envahissant le golfe de Guinée agissent dans le même sens) et le quatrième parallèle Nord en janvier (l'anticyclone saharien, bien marqué, dirige un flux fort et régulier d'Harmattan, alors que la mousson est faible, parfois inexistante, l'anticyclone austral s'étant retiré vers le Sud).

Sur l'océan la ZCIT (ou ITCZ des anglo-saxons) a une remontée moins septentrionale et ce d'autant plus que l'on s'éloigne du continent africain.

Dans son oscillation saisonnière, la ZCIT (ou FIT sur le continent) entraîne quatre zones de temps. Ce sont, du Nord au Sud :

- la zone A : immédiatement au Nord du FIT. Zone de l'Harmattan. le ciel est clair, ou peu nuageux par rares cirrus aux niveaux supérieurs ;
- la zone B : immédiatement au sud du FIT (400 kilomètres de largeur environ). Ciel peu nuageux, par cumulus peu développés en général ;

- la zone C : plus au sud (1 200 kilomètres de largeur). Ciel ouvert ou très nuageux par gros cumulus ou cumulo-nimbus. Orages, grains, lignes de grains ;
- la zone D : encore plus au Sud. Nuages stratiformes. Pas ou très peu de précipitations.

C'est le déplacement en latitude de ces quatre zones qui détermine les saisons ; les zones A (ou B), C et D correspondant respectivement, lorsqu'elles intéressent une région déterminée, à la grande saison sèche, à la saison des pluies et à la petite saison sèche (Olivry, 1984).

Seules les zones A, B et partiellement C intéressent les îles du Cap Vert.

- La zone A située au Nord de la trace au sol du FIT ou de la ZCIT présente un ciel clair, l'air est sec et marqué par une forte amplitude diurne de la température. Des pluies dues aux invasions d'air polaire boréal en altitude peuvent se produire, elles sont généralement faibles sauf sur les reliefs. Mais d'une manière générale, les alizés du N-E ont un parcours maritime trop court pour s'humidifier suffisamment et pouvoir provoquer des précipitations.
- Par temps d'Harmattan, de plus en plus fréquent depuis 1970, le ciel est envahi par les brumes sèches et nuages de poussières, venues du Sahara. Les dunes de sable

blanc de Boa Vista sont d'origine éolienne saharienne.

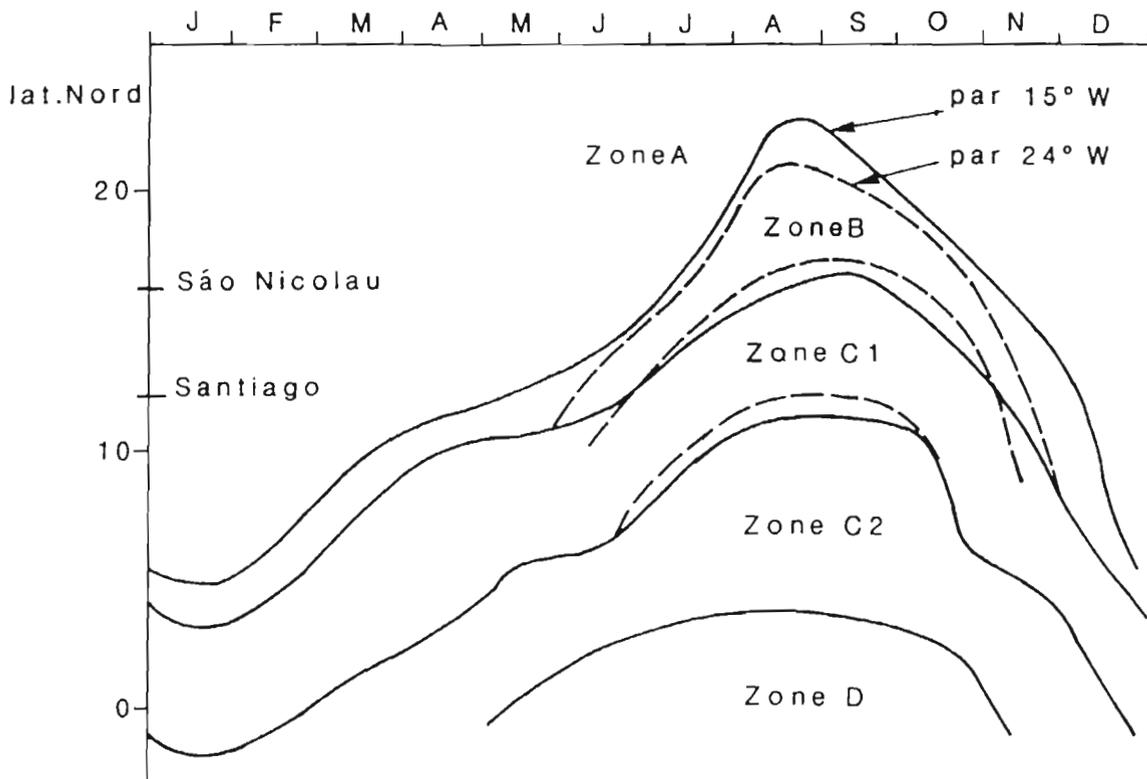
- La zone B située au Sud de la ZCIT est caractérisée par une faible épaisseur de mousson, son extension méridienne est variable suivant les saisons et les masses d'air en présence. Dans certains cas exceptionnels, elle peut atteindre 400 km.

Le temps dans la zone B est caractérisé par des formations nuageuses à forte évolution diurne et des orages isolés pouvant se produire en cours d'après midi.

- La zone C située au sud de la zone B correspond à la zone où l'importance du flux de mousson est maximale, elle est généralement une zone de forte convergence. Pour différencier les régimes perturbés à dominante orageuse de ceux à dominante pluies abondantes, la zone C est divisée en deux zones C1 et C2. La zone C1 correspond à celle où circulent les perturbations orageuses mobiles de l'Afrique. La zone C2 correspond à celle où l'épaisseur de la mousson est maximale ; elle n'atteint que très rarement le Cap-Vert.

La figure 1.3 propose l'évolution de cette zonalité saisonnière à la longitude de 15° (200 km à l'Est de Dakar) et par 24° Ouest dans l'archipel des îles du Cap-Vert. La frange sahéenne est située entre 11° et 21° environ. Ceci conduit à conclure, que tout le sahel continental est intéressé essentiellement par les types B et C1 en situation moyenne pendant l'été boréal.

AFRIQUE DE L'OUEST CABO VERDE



Variation saisonnière moyenne de la zonalité climatique intertropicale en Afrique de l'ouest et aux Iles du Cap Vert

Fig. 1-3

Pour les îles du Cap-Vert, il ne faut pas espérer des types de temps autres que celui du type B, c'est à dire caractérisé par une faible épaisseur de mousson (1 000 à 1 500 m) qui donne sur le continent des précipitations annuelles de l'ordre de 200 à 400 mm du type lignes de grains et orages isolés. Si cela peut être nuancé pour les îles du sud, c'est toujours vérifié à São Nicolau.

En fait, l'apparition des pluies dans les îles Barlavento correspond davantage à des pulsions de la masse d'air humide entraînant la ZCIT vers le nord pour de courtes périodes de précipitations. Le phénomène "mousson" est très rarement observé (Leroux, 1980).

Babau, Alves et Silva (1981) illustrent bien cette rapide variation de la puissance des précipitations sur le transect Sud-Nord pour lequel ils ont calculé les précipitations moyennes sur la période 1950-1973 :

- île de Maio : 219 mm
- île de Boavista : 128 mm
- île de Sal : 84 mm.

Ces trois îles sont situées sur un développement de 1°30 en latitude.

Les conditions synoptiques à la verticale de Praia (15°N) correspondent à celles observées à Nouakchott en Mauritanie 3° plus au Nord.

Dans l'archipel, hors l'exposition et les reliefs, le caractère d'aridité est donc plus accentué que sur le continent pour une même latitude.

## 4.2 OBSERVATIONS CLIMATIQUES

La carte de la figure 1.4 représente les différentes composantes déterminant le climat dans l'Archipel du Cap-Vert.

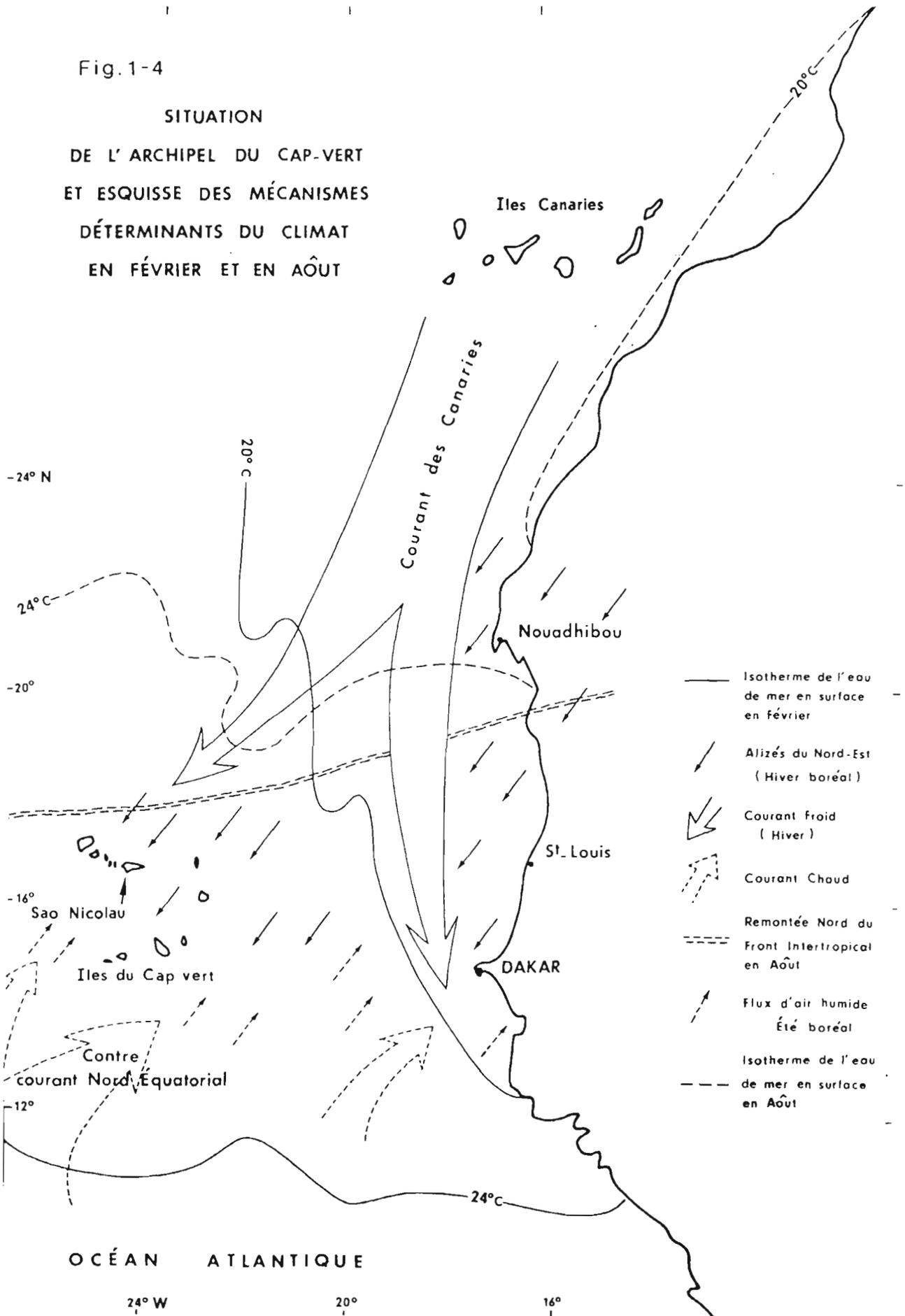
On a indiqué les isothermes de surface (SST) du mois d'août et du mois de février de 24° et 20°C. L'isotherme 24°C remonte de 10 degrés de latitude pendant l'été boréal. Les eaux qui baignent l'archipel ont une température alors comprise entre 26 et 28°C. L'isotherme d'hiver de 20°C descend très largement au sud de Dakar sur la côte africaine mais n'atteint pas l'archipel où les températures de l'eau de mer restent comprises entre 21° et 22°C. Le courant des Canaries, puissant pendant huit mois de l'année, est mieux marqué au large de la Mauritanie et du Sénégal qu'au coeur de l'Archipel du Cap-Vert. La figure montre également les remontées du contre-courant Nord-Equatorial et les flèches des vents porteurs du flux d'air humide pendant l'été boréal. A cette situation correspond la position la plus septentrionale de la ZCIT (FIT sur le continent).

Les températures sont beaucoup plus douces que sur le continent à ces mêmes latitudes. L'océan tempère les variations thermiques saisonnières et les amplitudes journalières. Les températures moyennes sont plus élevées dans le sud.

A. Chevalier (1935) cite les valeurs de température moyenne annuelle de 24°C et 25°C respectivement pour Mindelo à São Nicolau et Praia à Santiago ; la moyenne des

Fig.1-4

SITUATION  
DE L'ARCHIPEL DU CAP-VERT  
ET ESQUISSE DES MÉCANISMES  
DÉTERMINANTS DU CLIMAT  
EN FÉVRIER ET EN AOÛT



maxima serait respectivement de 26 et 28°C, celle des minima de 20 et 21°C.

Sur la période 1959-1968 étudiée à Santiago on retrouve bien cette valeur moyenne annuelle de 25°C. Les valeurs moyennes mensuelles de Praïa sont les suivantes.

- Janvier 21°6, Juillet 25°8
- Février 23°, Août 26°5
- Mars 23°2, Septembre 26°7
- Avril 23°9, Octobre 26°2
- Mai 24°1, Novembre 25°6
- Juin 25°, Décembre 23°8

Les amplitudes journalières sont de l'ordre de 2 à 4°C.

La saison chaude se situe en août-septembre ; le mois le plus froid est généralement le mois de janvier. En altitude, les températures baissent, bien évidemment, avec un gradient moyen de 0,8°C par 100 m.

L'hygrométrie est assez mal connue. A Praïa, l'humidité relative reste peu élevée malgré la situation insulaire et cela est dû pour beaucoup à la faiblesse du couvert végétal. Sur la décennie 1951-1960, on a en moyenne :

- pour mars, le mois le plus sec, 53,3% à 10 h, 53,3% à 16 h, 67,1% à 22 h
- en juin, 59,6% à 10 h, 58,7% à 16 h, et 72,9% à 22 h
- pour septembre, le mois le plus humide : 70,2% à 10 h, 71% à 16 h, et 81,2% à 22 h

- en septembre 63,1% à 10 h,, 62,6% à 16 h, et 73,1% à 22 h

L'humidité augmente avec l'altitude.

Les précipitations sont d'une irrégularité saisonnière déjà soulignée ; à cela s'ajoute une irrégularité spatiale rarement aussi prononcée dans d'autres archipels même si les abats d'eau relevés sur les versants les plus exposés n'atteignent jamais les fortes valeurs de la Caraïbe. Il faudrait une monographie complète pour étudier les régimes pluviométriques de l'Archipel. Les précipitations de São Nicolau sont étudiées dans le chapitre III. Les données de base ont été publiées jusqu'en 1977 pour l'ensemble de l'archipel dans un recueil de valeurs numériques (précipitations journalières de l'origine des stations à 1977 en République du Cap-Vert, 1983).

On constate, toutes choses égales par ailleurs, que la pluviométrie augmente quand la latitude diminue et quand l'altitude augmente.

On a repris dans le tableau 1.2 les indications fournies par le BURGEAP (1974) sur 7 îles étudiées. Les données portent sur la période 1951-1970 et doivent être sérieusement revues à la baisse d'abord parce que la période déficitaire des quinze dernières années n'est pas prise en compte, ensuite parce que la période étudiée correspond à une période humide.

STATIONS	P > 10		P > 30 mm		P > 50 mm				P > 100 mm		P. max journal.	P. moy. Annuelle
	n	n	h	n	h	H	%					
<u>BOA VISTA</u> Fundo de Figueiras	3,5	0,78	57	0,44	73	33	33	0,11	119	119	99	
	2,5	0,8	72	0,2	83	17	19	0,1	101	101	87	
	3	0,79	65	0,32	77	24	26	0,11	110	119	93	
Povação Velha	4,4	1,5	54	0,66	74	50	34	0	122	122	145	
	2,9	1	64	0,67	75	52	47	0,05	0	95	111	
	3,6	1,26	58	0,68	75	50	40	0,1	122	122	127	
Sal Rei	5	1,6	55	0,9	68	61	35	0,01	155	155	176	
	2,8	1,2	62	0,6	90	54	43	0,01	175	175	118	
	3,8	1,4	58	0,75	77	57	39	0,01	165	175	147	
<u>BRAVA</u> Vila Sintra	12,5	4,9	71	2,7	99	268	46	0,9	167	325	578	
	8,5	2,2	63	1	93	93	31	0,2	137	155	294	
	10	3,5	68	1,8	97	180	41	0,55	162	325	436	
<u>MAIO</u> Vila do Maio	7,4	2,5	86	1,3	130	169	51	0,7	185	350	332	
	4	1,4	62	0,9	78	70	45	0,2	107	108	156	
	5,7	1,95	78	1,1	108	119	49	0,45	168	350	244	
<u>SAL</u> Espargos	3,2	0,9	57	0,6	68	41	37	0,1	102	102	109	
	2,1	0,7	66	0,4	87	35	40	0,1	155	155	87	
	2,65	0,8	61	0,5	76	38	38	0,1	155	155	98	
<u>SANTIAGO</u> Praia	6,5	2,3	63	1,3	83	108	40	0,3	213	213	270	
	5,5	2,1	55	1,1	70	77	36	0,1	118	118	212	
	6	2,2	59	1,2	77	93	38	0,2	135	213	241	
<u>SAO NICOLAU</u> Vila Ribeira Brava	10,6	4,7	55	2,1	73	153	39	0,4	121	175	390	
	5,5	1,8	59	1	77	77	39	0,2	130	158	198	
	8	3,25	56	1,55	74	108	39	0,3	124	175	294	
<u>SAO VICENTE</u> Mindelo	4	1,6	54	0,6	83	49	28	0,1	151	151	176	
	2	0,4	37	0				0			68	
	3	2	51	0,3	83	25	20	0,05	151	151	122	

Tableau 1.2 Classement des pluies journalières et indication des hauteurs de précipitation moyenne annuelle

(Pour chaque station la première ligne correspond à la décennie 1951-1960, la seconde à la décennie 1961-1970, la troisième à l'ensemble 51/70)

**Légende :**

- n : nombre de pluies par an supérieure à une hauteur P connue
- h : hauteur moyenne correspondante
- H : total en moyenne annuelle, des précipitations supérieures à 50 mm
- % : pourcentage par rapport aux précipitations totales

On peut indiquer en complément, pour Fogo, que la moyenne des précipitations reçues à San Felipe en 42 ans est de 181,3 mm (écart type de 129 mm). A S. Antaô, Carlos Nogueira Ferrao (cité par A. Chevalier, *op. cit.*) indiquait à la fin du siècle dernier 907 mm de pluie moyenne pour le haut bassin de la R. Paul.

Mais à Ponta do Sol en bordure de mer, la moyenne sur 30 années n'est plus que de 239 mm avec un écart-type de 145 mm.

Dans tout l'archipel août et septembre, et surtout septembre, sont les mois les plus arrosés.

Ce sont d'ailleurs les seuls mois qui apparaissent, pour certaines stations seulement, comme des mois humides suivant la définition de Gausson qui fixe comme valeur de P en mm d'un mois sec toute valeur inférieure au double de la température moyenne mensuelle exprimée en °C. La saison sèche dure de novembre à Juin.

La figure 1.5 montre les ombrothermogrammes de 6 stations de six îles de l'archipel toutes en bordure de mer à l'exception de Vila Nova à Brava. Seules les îles de Santo Antão, (São Nicolau pour Vila de Ribeira Brava), Brava, Fogo et Santiago montrent des mois "humides" en septembre et en août ; ailleurs les précipitations mensuelles restent inférieures à 2T. On remarque également la disparition au sud des pluies d'hiver dues à des descentes méridionales d'air polaire.

Mais ces résultats publiés par FONSECA (1962) sont largement altérés par la quinzaine d'années déficitaires que viennent de connaître les îles du Cap-Vert. Cette récente sécheresse constitue avec celles qui l'ont précédée, le caractère le plus limitant des possibilités de développement de l'Archipel.

### 4.3 LES SECHERESSES

Les sécheresses font dramatiquement partie intégrante de l'histoire du peuple cap-verdien. Les famines et les vagues d'émigration constituent autant de repères historiques qui suggèrent des déficits pluviométriques catastrophiques. Leur généralisation à toutes

les îles, ou leur caractère pluriannuel sont cependant plus difficiles à préciser.

Suivant que l'on traite de la cause ou de l'effet, des décalages d'un an sont fréquents entre les phénomènes climatologiques et ses conséquences humaines.

On peut citer les épisodes de sécheresse suivants :

- en 1748-1750
- en 1773-1775
- en 1831-1833 famine ayant fait 30 000 morts
- pendant une quinzaine d'années vers 1850 avec un maximum en 1864-1866 (famine ayant fait 30 000 morts)

Année	Précipitation (P en mm)	Année	Précipitation (P en mm)	Année	Précipitation (P en mm)	Vila (S. N.) (P en mm)
		1905	177,2	1944	245,6	162,6
		1906	864,9	1945	148,2	218,5
		1907	199,4	1946	106,6	136,1
		1908	147,5	1947	45,8	90,9
		1909	222,1	1948	64,9	121,5
		1910	194,6	1949	466,2	238,9
		1911	142,4	1950	442,2	226,3
		1912	166,1	1951	362,4	248,2
		1913	176,5	1952	595,8	253,8
		1914	237,9	1953	136,2	654,6
		1915	147,8	1954	265,6	246,4
		1916	472,8	1955	204,2	297,3
		1917	166,5	1956	192,5	682,7
		1918	566,0	1957	314,3	411,6
		1919	175,8	1958	148,0	472,7
		1920	26,6	1959	85,0	86,4
		1921	65,3	1960	96,5	243,9
		1922	173,1	1961	159,6	410,2
		1923	152,4	1962	219,2	202,9
		1924	153,0	1963	202,2	202,8
		1925	215,2	1964	182,7	261,5
		1926	95,5	1965	162,2	176,0
		1927	520,7	1966	258,7	165,0
		1928	228,1	1967	438,1	217,5
		1929	168,0	1968	102,9	25,0
		1930	150,6	1969	221,2	149,0
		1931	190,0	1970	20,4	08,1
		1932	100,7	1971	11,2	26,2
		1933	100,8	1972	13,2	2,0
		1934	142,2	1973	41,5	102,0
		1935	197,0	1974	104,0	17,0
		1936	4,0	1975	409,2	238,4
		1937	302,0	1976	130,0	20,2
		1938	174,6	1977	21,4	81,2
		1939	164,5	1978	88,2	144,9
		1940	222,6	1979	221,4	126,2
		1941	178,2	1980	229,2	164,5
		1942	182,2	1981	29,0	197,1
		1943	428,2	1982	84,0	40,5

Tableau 1.3 Précipitations aux îles du Cap-Vert (Précipitation à Vila de Ribeira Brava (São Nicolau))

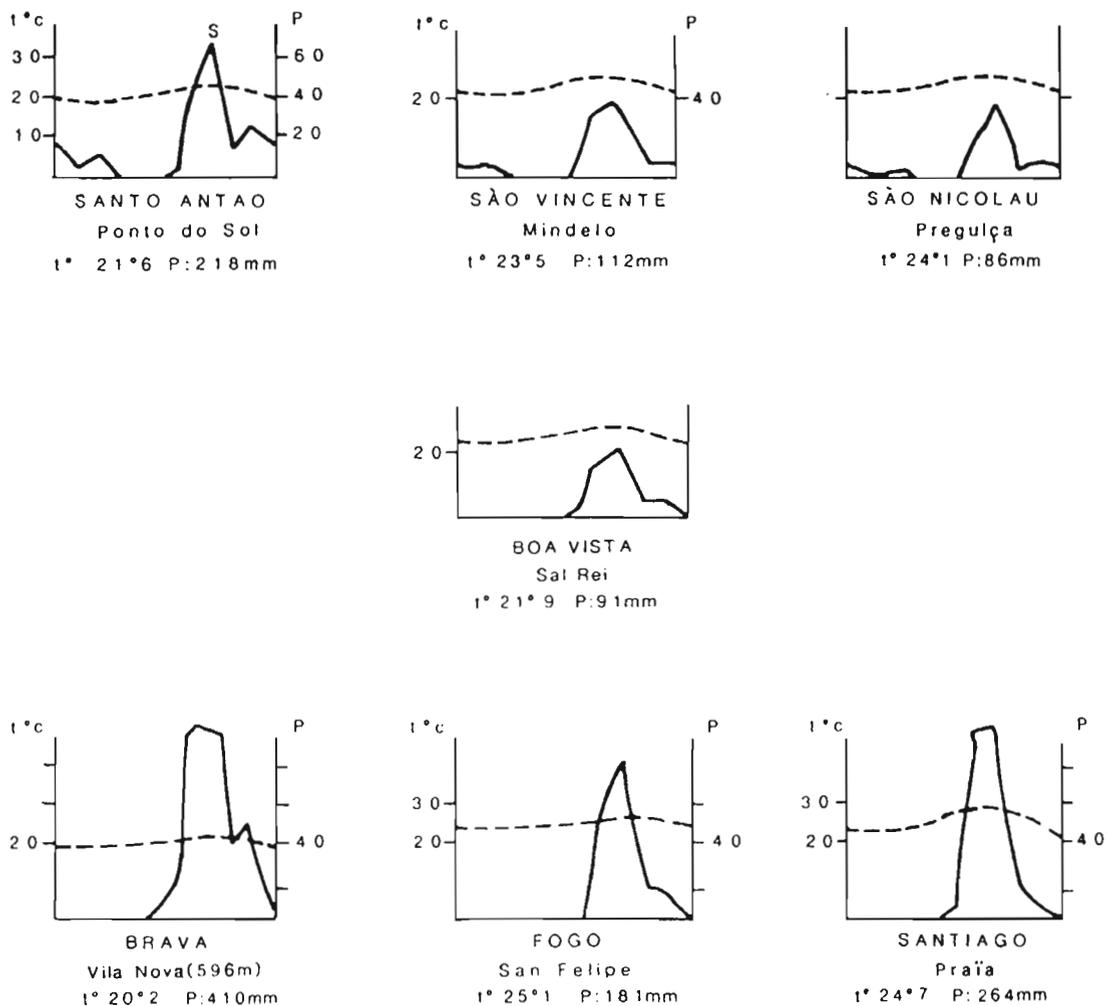


Fig.1-5 Ombrothermogrammes de quelques villes de l'Archipel des îles du Cap Vert

(Selon GAUSSEN, seuls les mois dont la courbe des précipitations dépasse celle des températures suivant l'échelle choisie (P 2T) ne sont pas des mois secs) (d'après FONSECA 1962)

- de nouveau en 1885
  - en 1902-1904 (12000 morts)
  - en 1920-1923
  - en 1941-1942
  - en 1946-1948.
- toutes ces crises de la première moitié du XXème siècle ont entraîné la mort de 100 000 personnes (N. E. Cabral, 1980).

- Le dernier épisode qui dure pratiquement depuis 1968, avec des maximums de déficit en 1972-1973 et 1982-84, est particulièrement marqué au Sahel africain. Cette concordance souligne sans doute l'importance du phénomène actuel car les grands déficits africains de 1913 ne se retrouvent pas aux îles du Cap-Vert, preuve qu'il n'y a pas forcément simultanéité entre les sécheresses du continent et celles de l'archipel. N. E. Cabral (1980) souligne que la dernière sécheresse n'a pas connu les drames des précédentes du fait d'un plan préventif de travaux publics généralisés, lancé par le gouverneur Silvino Silverio Marques (1958-1964), assurant un minimum de revenus à un maximum de foyers ruraux. Depuis l'indépendance en 1975, l'aide internationale a largement contribué à limiter les conséquences dramatiques d'une vie économique basée sur l'agriculture devenue moribonde.

Dans les figures 1.6 et 1.7 nous avons reproduit les variations interannuelles des précipitations reçues à Praia depuis 1975 et à Vila depuis 1941 (Olivry, 1983) ainsi que leurs moyennes mobiles et une courbe de lissage.

Les totaux pluviométriques annuels ont été indiqués dans le tableau 1.3.

La courbe, malgré son aspect assez irrégulier, montre que depuis un siècle la tendance générale s'inscrit nettement à la baisse. Grosso modo, la hauteur annuelle de précipitation paraît avoir diminué de moitié.

Cette tendance décroissante générale est affectée, tous les dix à quinze ans, de brefs "sursauts pluviométriques". On note seulement deux séquences humides un peu plus longues : 1887-1900 et 1949-1957.

Sur la période observée, les années complètes les plus sèches sont : 1885, 1903, 1920, 1972-1973 et 1977. La coïncidence chronologique avec les observations faites sur le continent africain n'apparaît vraiment que pour l'actuelle sécheresse. Les relevés de Praia et de Saint Louis du Sénégal n'ont en commun qu'une tendance générale à la diminution des précipitations ; ainsi la séquence pluvieuse des années 50 à Praia est à peine sensible à Saint Louis et si la tendance humide est mieux ressentie à cette époque sur le fleuve Sénégal, elle s'y poursuit tout de même 10 ans de plus qu'à Praia.

Afin de s'assurer que l'échantillon de valeurs de Praia ne traduisait pas une distribution des pluies ponctuellement aléatoire mais seulement des variations des conditions climatiques, aléatoires ou non, subies par l'archipel, il a paru intéressant de comparer ces valeurs à l'échantillon des hauteurs pluviométriques annuelles recueillies depuis 1941 à

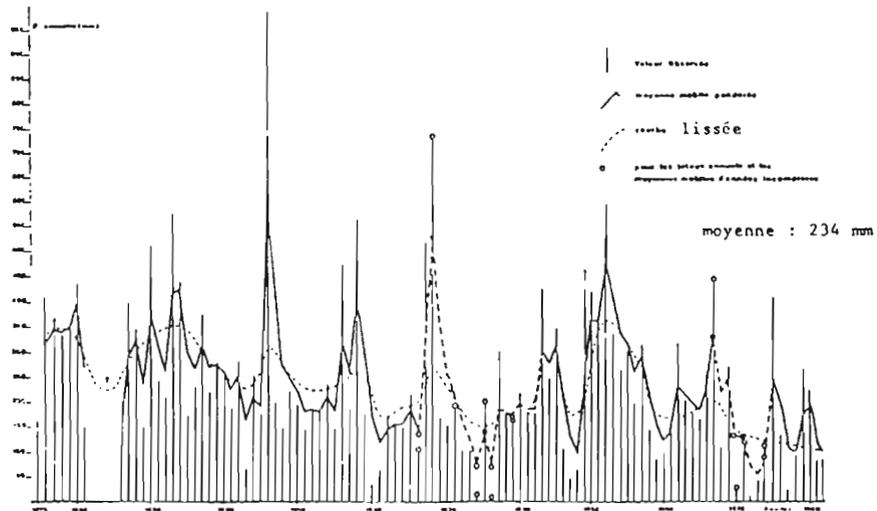
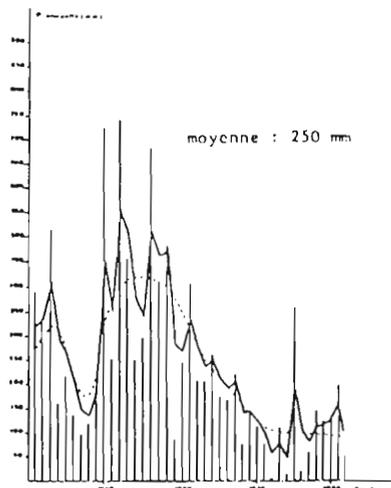


Fig. 1-6 — Pluviométrie annuelle et moyennes mobiles annuelles à Praia São Tiago (Cabo Verde)



— Pluviométrie et moyennes mobiles annuelles à Vila de Ribeira Brava, São Nicolau (Cabo Verde)

Fig. 1-7

(d'après OLIVRY 1983)

Vila da Ribeira Brava sur l'île de São Nicolau, deux cents kilomètres au nord-ouest de l'île de Santiago (Olivry, 1981).

La comparaison des figures 1.6 et 1.7 sur la période commune d'observation montre des variations très semblables avec en particulier un premier pic dans les années 50 ; suit une longue phase descendante depuis 1960 qui aboutit à la période actuelle ; seule anomalie dans le schéma : un regain de pluviosité en 1967, 68 à Praïa non perçu à Vila. Enfin, la persistance de la sécheresse se confirme pour ces dernières années.

Sur la base de cette comparaison, il paraît raisonnable de penser que les relevés de Praïa sont représentatifs de l'évolution des conditions climatiques de l'archipel qui se traduit donc par une tendance générale à la baisse sur les cent dernières années et qui ne présente aucun indice d'éventuelles variations cycliques.

Par contre, si l'on s'en rapporte aux chroniques des famines subies par l'archipel, aux conséquences démographiques dramatiques, une certaine périodicité apparaît ; leurs dates sont en partie en coïncidence avec celles des plus forts déficits pluviométriques : c'est le cas en 1885, 1903, au début des années 20 et en 1947-1949 ; 1972 a été moins durement ressentie grâce à l'aide internationale. Mais la famine de 1941-43 ne correspond pas à un déficit pluviométrique à Praïa ; de même la décennie des années 20 qui a posé problème n'est pas particulièrement déficitaire en précipitations dans sa seconde moitié. Dans

l'autre sens, les déficits de 1950-60 n'ont pas laissé le souvenir d'événements aussi dramatiques que les précédentes famines. La répartition des pluies, dans l'année, au cours de la saison des pluies, pendant le cycle végétatif des espèces végétales les plus cultivées telles le maïs, est un facteur pouvant conduire dans ces trois cas à des déficits de production agricole et par suite à des famines, sans que cela implique nécessairement de très faibles totaux annuels. La coïncidence des déficits pluviométriques et des famines a toutefois une grande occurrence.

Les événements historiques peuvent constituer l'indice d'événements climatiques, ils ne remplacent pas les variables mesurées. L'interprétation quantitative de tels événements est alors très objective ; mais l'histoire et d'autres observations ont permis depuis longtemps aux climatologues de définir les grands traits de l'évolution historique des climats en Afrique. Dans l'état actuel de nos connaissances, rien n'indique de détérioration "définitive" des conditions climatiques, rien n'appuie l'hypothèse de variations cycliques. Les sécheresses apparaissent davantage comme des phénomènes aléatoires, éventuellement pluri-annuels, dont seule la probabilité statistique peut être estimée et dont la récurrence n'implique aucune idée de périodicité, phénomènes aléatoires qui n'excluent pas la répétition d'années sèches comme dans la période actuelle.

Mais la succession de périodes humides et sèches constitue bien un fait d'observation ; il

est possible que la distribution des variables climatiques ne soit pas seulement un phénomène aléatoire ; aux valeurs extrêmes, correspondent sans doute des modifications des mécanismes régissant les conditions climatiques générales des régions inter-tropicales, et induisant, par elles-mêmes, l'extension géographique des manifestations sèches ou humides et un certain effet de persistance. Mais on a vu que les observations et nos connaissances actuelles ne permettent pas d'accepter le déterminisme d'une périodicité définie dans l'apparition des phénomènes.

Quant à la situation actuelle -celle des années 80-, le moins que l'on puisse dire c'est que la sécheresse sévit toujours et se manifeste encore dans toute son ampleur. Rien n'indique vraiment dans les observations l'amorce d'une amélioration. On peut seulement espérer que la probabilité d'un renversement de tendance augmente au fil des années et il n'est pas exclu alors qu'on retrouve très rapidement un régime de précipitations plus favorable. Mais cela ne signifiera pas pour autant, aux îles du Cap-Vert, l'abondance de la ressource en eau dont le caractère d'aridité ou de semi-aridité paraît définitivement acquis.

## 5 LA COUVERTURE VEGETALE DANS L'ARCHIPEL

### 5.1 UNE VEGETATION NATURELLE PAUVRE

Auguste Chevalier (1935) dans son ouvrage "Les îles du Cap-Vert - Flore de l'Archipel" a fait une synthèse exhaustive des travaux de reconnaissance et d'inventaire des espèces végétales rencontrées dans les îles par lui-même et ses prédécesseurs (1). L'appauvrissement constant de la couverture végétale a sans doute entraîné en cinquante ans la disparition d'un grand nombre d'espèces ; mais, par ailleurs, d'autres espèces ont été introduites par les aménageurs (reboisement, etc.).

A. Chevalier estime à trois cents espèces seulement la flore spontanée de l'archipel, avec seulement 92 espèces endémiques ; les autres espèces constituent une flore insulaire apportée. La pauvreté du milieu végétal, au plan des espèces, s'explique par l'éloignement des îles du continent. Le peuplement végétal comprend peu d'espèces en provenance du Sénégal, et de la côte africaine ; par contre le courant des Canaries, les vents alizés du N.E ont contribué à un peuplement d'espèces méditerranéennes ou provenant des archipels macaronésiens situés au nord du Cap-Vert. C'est le peuplement le plus important.

-----  
(1) Avant A. Chevalier, Geoffroy St Hilaire est un des premiers Français à s'être intéressé à la flore cap-verdienne et en particulier à l'herbier récolté par J. Da Silva Feijo qui fut ramené de Lisbonne au Muséum de Paris dans les bagages des armées napoléoniennes (1808, Général Junot)

On doit encore ajouter les peuplements végétaux qui ont suivi la venue de l'homme. Les éléments introduits l'ont été pour la majeure partie à son insu puisqu'on dénombre cent cinquante espèces de mauvaises herbes dont la dissémination a certainement été assurée par les chèvres.

### 5.2 LES ETAGES DE LA VEGETATION

Schmidt a distingué dans les îles hautes :

- un étage tropical depuis la mer jusqu'à 600 m d'altitude
- un étage subtempéré de 600 à 1 000 m d'altitude (composées frutescentes)
- un étage tempéré observé au-dessus de 1 000 m (labiées frutescentes)

De fait il y a une modification progressive de la végétation en altitude et il paraît plus raisonnable de limiter la phytogéographie des îles à une zone basse en-dessous de 700 à 800 m qu'on pourrait appeler étage aride ou semi-aride et une zone montagneuse. Dans cette dernière, la végétation d'altitude peut profiter de ravins ou ribeiras bien encaissés, exposés à l'alizé pour descendre presque au niveau de la mer.

Dans chaque massif montagneux on doit évidemment distinguer le versant aride soumis aux vents secs et le versant soumis à l'alizé dont les ravins abrités accueillent une végétation mésophile, mais aussi caféiers, arbres fruitiers et la canne à sucre... sans

laquelle la vie ne serait que ce qu'elle est. Les rochers sont, au versant de l'alizé, recouverts de longs sarments de *Sarcostemma daltoni* dont la couleur verte évoque une illusoire humidité. Mais la végétation naturelle n'est plus représentée que par des reliques çà et là. Des siècles de surexploitation débridée, pour alimenter les populations en bois de chauffe, pour créer de nouveaux espaces agricoles devant répondre aux besoins alimentaires d'une démographie croissante, mais aussi pour un élevage pléthorique de chèvres retournées à la vie sauvage, ont abouti à désertifier la majeure partie du territoire de l'archipel. Ce constat n'est pas nouveau : A Chevalier écrit "Aux îles du Cap-Vert l'homme a tout défriché pour se procurer des terrains de culture ; les troupeaux errants ont fait le reste. Il n'existe même plus de bois de feu dans l'archipel. Ce sont bien des îles dépouillées". Cette disparition de la végétation n'est probablement pas étrangère à une accentuation des déficits de la ressource en eau ; plus loin, l'étude des précipitations occultes soulignera le rôle déterminant des arbres dans le captage naturel de l'humidité de l'air.

### 5.3 LA REFORESTATION

Cette dévastation sauvage par l'homme de son environnement a ému depuis longtemps les responsables de l'Archipel. En 1928, Avelas Brotero n'est déjà plus un précurseur quand il recommande l'introduction de pins et diverses espèces arbustives importées ; devant les difficultés rencontrées, il conseille de reconstituer la végétation d'arbres indigènes ou depuis longtemps acclimatés. A Chevalier en

1935, remarquait qu'il est plus facile de préserver et d'aménager cent hectares de forêt que de replanter un seul hectare, et que, dans un pays où les pluies sont rares, où le vent est violent, la tâche est particulièrement difficile. Ce reboisement doit être adapté à ce qui a pu être le paysage ancien de l'archipel.

*"Les îles n'ont probablement été que peu boisées même avant la colonisation, mais elles étaient sans doute en grande partie couvertes sur les hauteurs par le bush d'Euphorbes, de Sideroxylon, de Cytisus et de Dracaena et dans la plaine par le xéro-arboretum à Faidherbia ; cette végétation malgré sa xérophilie entretenait des microclimats beaucoup plus favorables au peuplement humain. Les eaux étaient retenues davantage près de la surface et elles pouvaient ainsi alimenter les sources ; ce manteau protégeait le sol contre les érosions ; enfin la température du sol était moins élevée et la pluviosité probablement plus forte".*

A. Chevalier recommandait d'abord les espèces indigènes. *"Sur les hauteurs : le Sideroxylon, le Piorro (Cytisus), le Dragonnier, les Ficus, dans le xéro-arboretum des basses altitudes : les acacia et le Faidherbia. Sur le littoral, multiplier d'une manière intense le Tamarix indigène pour empêcher l'extension des dunes. Il y aurait lieu aussi d'introduire l'Ethel (Tamarix articulata) du sud algérien. Il est une espèce exotique qui se recommande particulièrement pour tous les rivages sablonneux : c'est le Filao (Casuarina equisetifolia), déjà très répandu sur le littoral du Sénégal. Même à l'île de Sal si déshéritée, il en existe quelques beaux exemplaires et il y*

existe aussi quelques pieds d'Amandier des Indes (*Terminalia catappa*), arbre également intéressant à multiplier sur les rivages. Dans les terrains les plus arides des îles, avec quelques soins, on pourra répandre en sylviculture en leur donnant les soins appropriés : *Pistacia atlantica* Desf., *Schinus Molle* L., *Moringa pterygosperma* Gaertn., *Parkinsonia aculeata* L., *Salvadora persica* L., *Atriplex Halimus* L. (dans les salines), *Balanites aegyptiaca* Delile, *Prosopis juliflora* DC., *Tamarindus Indica* L., *Acacia scorpioides* A. Chev., *A. Seyal* Delile, etc.

Dans l'intérieur, là où il existe encore un peu de terre, *Ailanthus glandulosa* Des., *Sophora japonica* L., des *Eucalyptus*, des *Acacia* d'Australie et en particulier *A. pycnantha* déjà introduit et dont les écorces sont riches en tanin. Citons enfin, *Platanus orientalis* L., *Pittosporum undulatum*, *Cola cordifolia*, enfin le beau *Khaya senegalensis* Juss. (il en existe déjà un magnifique exemplaire au jardin de Trinidad). Sur les montagnes, de préférence dans les ravins abrités, on pourrait tenter des expériences et essayer par exemple d'introduire les Lauracées des Canaries : *Persea indica* L., *Apollonias Canariensis* Nees., *Oreodaphne foetus* Nees, *Laurus Canariensis* Webb ou les conifères du même Archipel *Pinus canariensis* Sm., *Juniperus Cedrus* Webb, peut être aussi le Cèdre des Bermudes (*Juniperus Bermudiana*)".

Aujourd'hui, les problèmes forestiers dans l'archipel présentent trois aspects différents :

- la production de bois,
- la protection des bassins versants,

- la plantation d'arbres fourragers.

Dans son rapport de mission (FAC, 1976), le CTFT propose l'analyse suivante :

#### "a) La production de bois

Actuellement la production de bois au Cap-Vert est négligeable malgré quelques tentatives de reboisement. Les habitants, après avoir exploité pratiquement toutes les plantations, en sont réduits à utiliser comme combustible les moindres racines et souvent même les excréments séchés des animaux domestiques. Quant au bois d'oeuvre, il est importé entièrement du Portugal ou du continent africain.

On ne peut d'ailleurs pas, sous ce climat, espérer produire du bois en abondance et les plantations forestières devront se limiter à quelques périmètres de reboisement localisés en altitude. La question doit être traitée, de toute façon, à l'échelle de l'archipel car dans les îles basses et arides, il n'est pas question évidemment de faire des reboisements de production. Par contre, on peut envisager d'améliorer ou d'étendre les plantations existantes dans certaines parties montagneuses de l'île de Santiago où la nébulosité et les précipitations occultes entretiennent une humidité suffisante. Il en est de même dans l'île de Santo Antão qui paraît être la plus favorable à des reboisements de production. Les essences utilisées sont l'*Eucalyptus camaldulensis*, le Pin des Canaries, le Cyprès, le *Grevillea*, certains *Acacia*. Dans les zones plus basses et plus sèches, on pourrait utiliser le *Neem*

*(Azadirachta Indica)* qui ne paraît pas avoir été essayé jusqu'à présent.

b) *La protection des bassins versants*

*Dans l'aménagement rationnel des bassins versants, il est indispensable, pour limiter les risques d'érosion, d'interdire à la culture les parties les plus hautes et les pentes les plus fortes. Celles-ci doivent rester sous couverture végétale permanente : arbres ou arbustes. Or, ce n'est pas le cas actuellement où toutes les pentes sont livrées à la culture, en particulier celle du maïs qui est particulièrement dangereuse pour la conservation des sols.*

*A São Nicolau (bassin de Faja) une parcelle située à la partie supérieure du bassin versant avait été plantée jadis de Pins et d'Eucalyptus. Aujourd'hui il ne reste plus rien, les habitants ayant coupé tous les arbres pour faire du combustible. Il est certain que de telles plantations ne peuvent assurer leur rôle de protection des bassins versants que si leur exploitation est strictement réglementée, et si elle n'est jamais totale. Il est toujours préférable d'ailleurs de limiter les surfaces ainsi reboisées pour pouvoir en assurer une protection efficace. On s'adressera là aussi à des essences à croissance rapide, type Pin ou Eucalyptus, mais dans certains cas des plantations de *Prosopis* et d'*Acacia*, plus faciles à réussir et plus économiques, pourraient suffire. Il serait intéressant aussi de faire des essais de Caroubiers (*Ceratonia siliqua*) sur banquettes ; il s'agit d'un arbre dont les gousses sont utilisables pour la nourriture du bétail et qui*

*donne d'excellents résultats en Afrique du Nord. Il y en a quelques beaux exemplaires à Santiago.*

c) *Les arbres fourragers*

*Les pâturages de l'archipel sont dans l'ensemble très pauvres et l'herbe disparaît complètement pendant la saison sèche. Aussi, les autorités locales ont-elles cherché à développer la plantation d'arbres fourragers destinés à fournir aux animaux domestiques un appoint de nourriture. Le plus répandu est actuellement le *Parkinsonia aculeata* que l'on retrouve à Santiago, à São Nicolau, à Maio et sans doute dans d'autres îles. Il pousse bien dans les parties basses et arides à vocation pastorale et bien que sa valeur fourragère ne paraisse pas très élevée, il y a sans doute intérêt à en développer les plantations.*

*En tant qu'arbres fourragers, on a planté également avec succès le *Prosopis juliflora* et quelques *Acacias*, parmi lesquels il y aurait intérêt à développer spécialement *Acacia Albida* dans toutes les zones favorables, dans la partie Sud-Ouest de l'île de Santiago par exemple.*

*On pourrait essayer également le cactus inerme (*Opuntia ficus indica*) qui a déjà été importé du Mozambique et qui devrait réussir sur des sols filtrants et assez profonds.*

*Enfin, il serait intéressant de faire quelques essais de brise-vent avec les mêmes espèces : *Acacia, Prosopis et Parkinsonias*."*

## 5.4 PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES

Les planches des figures 1.8 à 1.12 montrent les principales espèces ligneuses dont on a souligné l'intérêt dans ce qui précède. Marc Chatelain, auteur de ces planches, en donne la description suivante :

### ***Dracaena draco* :**

*Le dragonnier est une espèce propre à trois archipels atlantiques : Madère, les Canaries et le Cap-Vert ; peu utilisable, elle s'est partout raréfiée, reculant vers les secteurs les plus difficilement accessibles. Au Cap-Vert, elle n'existe plus qu'en quelques secteurs des îles les plus montagneuses. A São Nicolau, les services agricoles locaux assurent la multiplication en pépinière, afin de sauver l'espèce de l'extinction.*

*Par scarification sur les tiges, les Cap-verdiens recueillent une résine rouge, le sang de dragon, avec laquelle on colore le grogue. Les dragonniers (représentés par une espèce voisine) se retrouvent à l'autre bout de l'Afrique, dans le désert somali, et sur l'île yéménite de Socotra.*

### ***Prosopis juliflora* :**

*Originnaire d'Amérique où elle est répandue, (de la Californie au Chili), cette espèce fut introduite dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle au Sénégal où elle est aujourd'hui acclimatée ; c'est beaucoup plus récemment qu'elle a été étendue au Cap-Vert où ses résultats en reboisement dans les zones arides sont*

*spectaculaires ; très résistant, il se développe vite, protégeant les sols, fournissant du bois de feu et du fourrage. Longévif, il résiste à des coupes répétées. C'est l'essence de reboisement la plus utilisée dans l'archipel où elle a bien peu de rivales. Ailleurs (en Arizona), par exemple, elle n'est parfois qu'une espèce secondaire plutôt fâcheuse, parce qu'extrêmement envahissante.*

### ***Faidherbia albida* :**

*Très voisin botaniquement des acacias, constituait autrefois une steppe arborée dans les zones basses de l'archipel. Surexploité pour son bois et son fourrage, il est en voie de disparition au Cap-Vert, c'est à Santiago qu'il est encore le plus fréquent.*

*En Afrique tropicale, il est protégé par les paysans qui apprécient ses étonnantes propriétés fertilisatrices. Formant son feuillage en pleine saison sèche, c'est le dispensateur miracle de fourrage en période de soudure ; au Cap-Vert cependant, ce rythme foliaire est très souvent inversé, ou du moins perturbé.*

### ***Parkinson aculeata* :**

*Le Parkinsonia, originaire d'Amérique centrale, est très utilisé dans les reboisements fourragers des zones basses de l'archipel, principalement sur l'île de Maio.*

*Il est depuis longtemps acclimaté dans les pays sahéliens (basse vallée du fleuve Sénégal..) mais son utilisation au Cap-Vert est récente, sa résistance à l'aridité est remarquable, mais ses*



Page précédente :

- 1 - Exemple imposant d'Acacia Nilotica dont le port rampant a été imposé par les vents dominants (alizés).
- 2 - Bel exemplaire de Dragonnier (voir l'homme partiellement caché par le tronc) au-dessus de Cachaço.
- 3 - Reboisement en pins et eucalyptus sur le versant nord du Monte Gordo.

dimensions sont modestes et sa longévité paraît faible ; c'est pourquoi, pour les mêmes utilisations, on préfère souvent utiliser *Prosopis juliflora*.

**Acacia nilotica :**

Cette espèce sahélienne ne semble pas être indigène dans l'archipel du Cap-Vert, mais elle y fut sans doute introduite voici bien longtemps, car des exemplaires fort importants y sont visibles. Cet acacia est très répandu à Santiago, dans le fond des ribeiras aux alentours de Praia. On le rencontre aussi çà et là sur les autres îles comme le *Faidherbia*, c'est une espèce très sensible au vent ; adoptant souvent un port rampant, il indique alors la direction des alizés. *Acacia nilotica* est parfois utilisé en alignement (rues de Praia). Au Cap-Vert, on le désigne souvent sous l'appellation "*Acacia arabica*", appellation à réserver plutôt à la variété de la péninsule arabe.

**Acacia farnesiana :**

Cette espèce occupe fréquemment au Cap-Vert les fonds de ribeiras aux côtés d'*Acacia nilotica* avec lequel on peut la confondre, elle en diffère par sa petite taille, son port touffu, son écorce claire et ses gousses renflées.

Originnaire d'Amérique du sud, elle s'est rapidement répandue en Afrique après son introduction, occupant le bord des oueds et des fleuves, du Cap-Vert jusqu'à l'Égypte. Compte tenu de sa taille, *A. farnesiana* ne peut guère fournir qu'un peu de fourrage et de bois de feu.

**Ziziphus mauritania :**

Il faisait partie, aux côtés du *Faidherbia* de la steppe arbustive qui recouvrait autrefois les zones basses de l'archipel, ce jujubier s'est depuis considérablement raréfié, dévoré par les chèvres et surexploité pour le bois de feu. Ses petits fruits qui apparaissent en milieu de saison sèche, sont appréciés des Cap-verdiens. Le jujubier reste présent sur toutes les îles, mais de plus en plus disséminé. Il existe environ 80 espèces de jujubiers, dans les régions tropicales et méditerranéennes du globe.

**Tamarindus indica :**

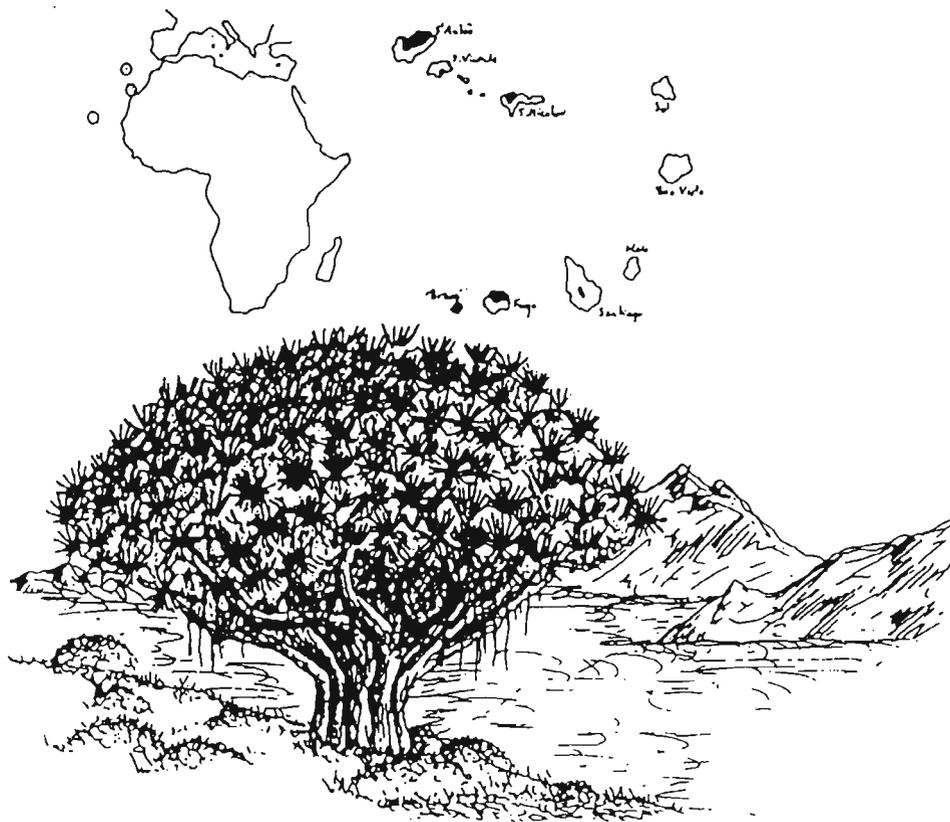
Le tamarinier est très répandu au Cap-Vert, où il est peut-être indigène. C'est un excellent arbre d'ombrage, mais dont la croissance est lente. Il est hélas en voie de raréfaction rapide, les jeunes plants étant dévorés par le bétail errant.

Les fruits acidulés sont appréciés ; on peut en faire des boissons, les Cap-verdiens, à la différence de leurs voisins continentaux, ne consomment pas les fleurs et les jeunes feuilles.

**Pyllanthus acidus :**

La surelle, originaire de Malaisie, est l'un des arbres fruitiers les plus répandus aux îles du Cap-Vert où on le plante généralement dans les zones irriguées.

Les fruits entrent dans la confection de confitures ; mangés frais, ils ont une saveur très acide. Groupés en grappes serrées sur les



DRACAENA DRACO

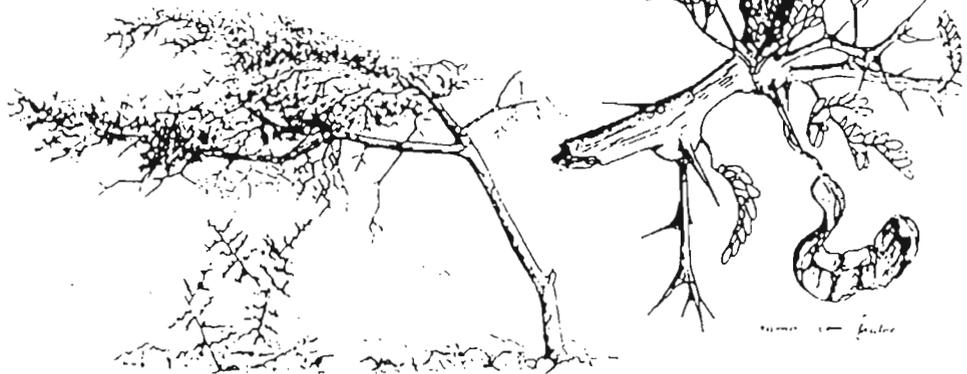
*Dragoeiro*

Fig. 1-8 (d'après Marc CHATELAIN)



PROSOPIS JULIFLORA

*Acacia americana*

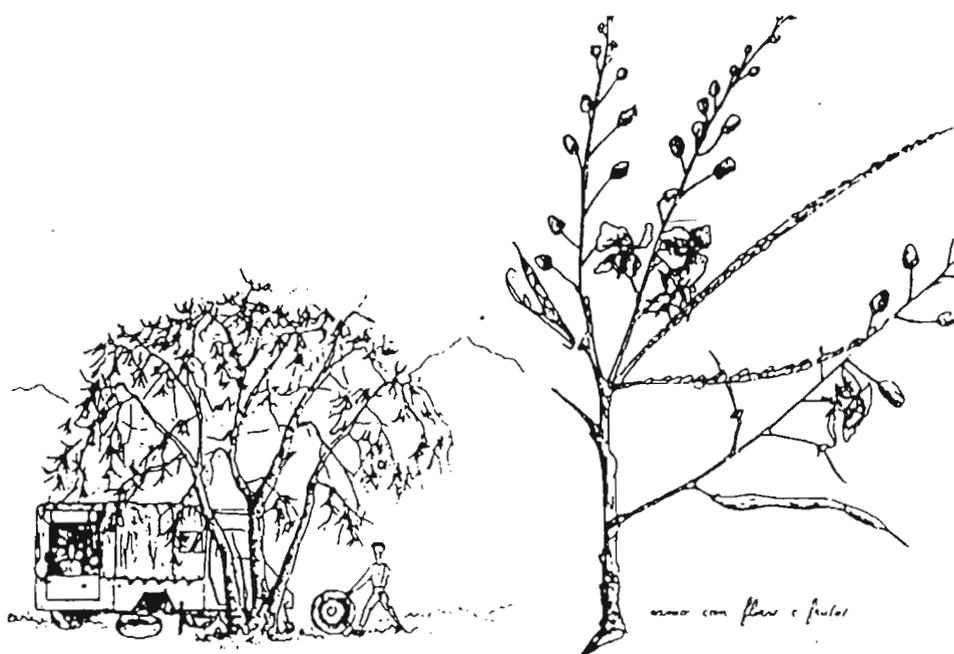


ERYTHRINA ALBA

*Eravaldo branco*

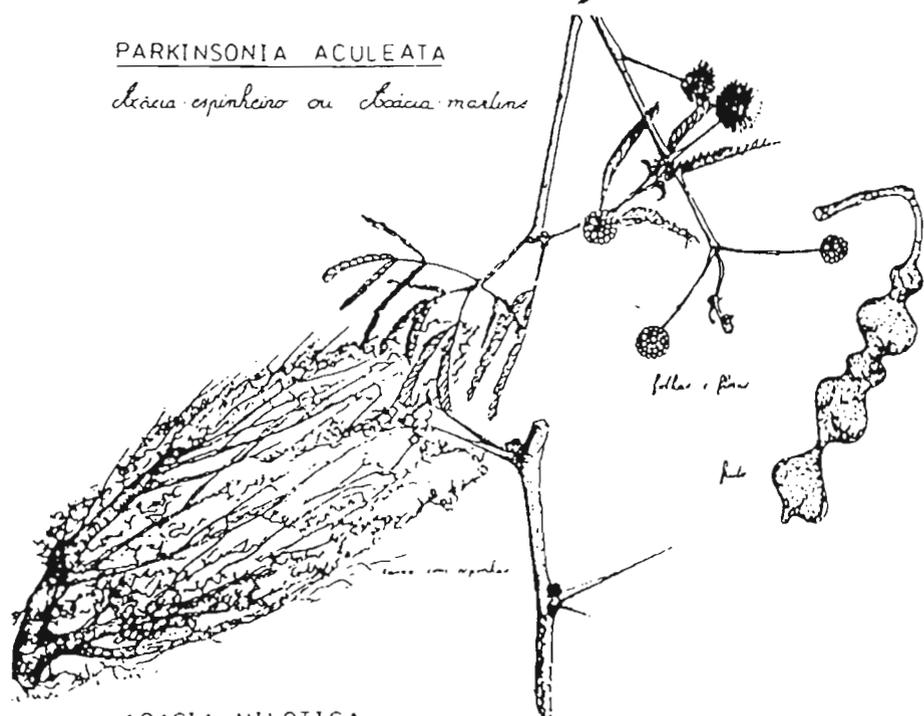
Fig. 1-9

(d'après Marc CHATELAIN)



PARKINSONIA ACULEATA

*Acacia espinheiro* ou *Acacia maritima*



ACACIA NILOTICA

*Acacia Esenhiara* ou *Esenhiara walteri*

Fig. 1-10

(d'après Marc CHATELAIN)

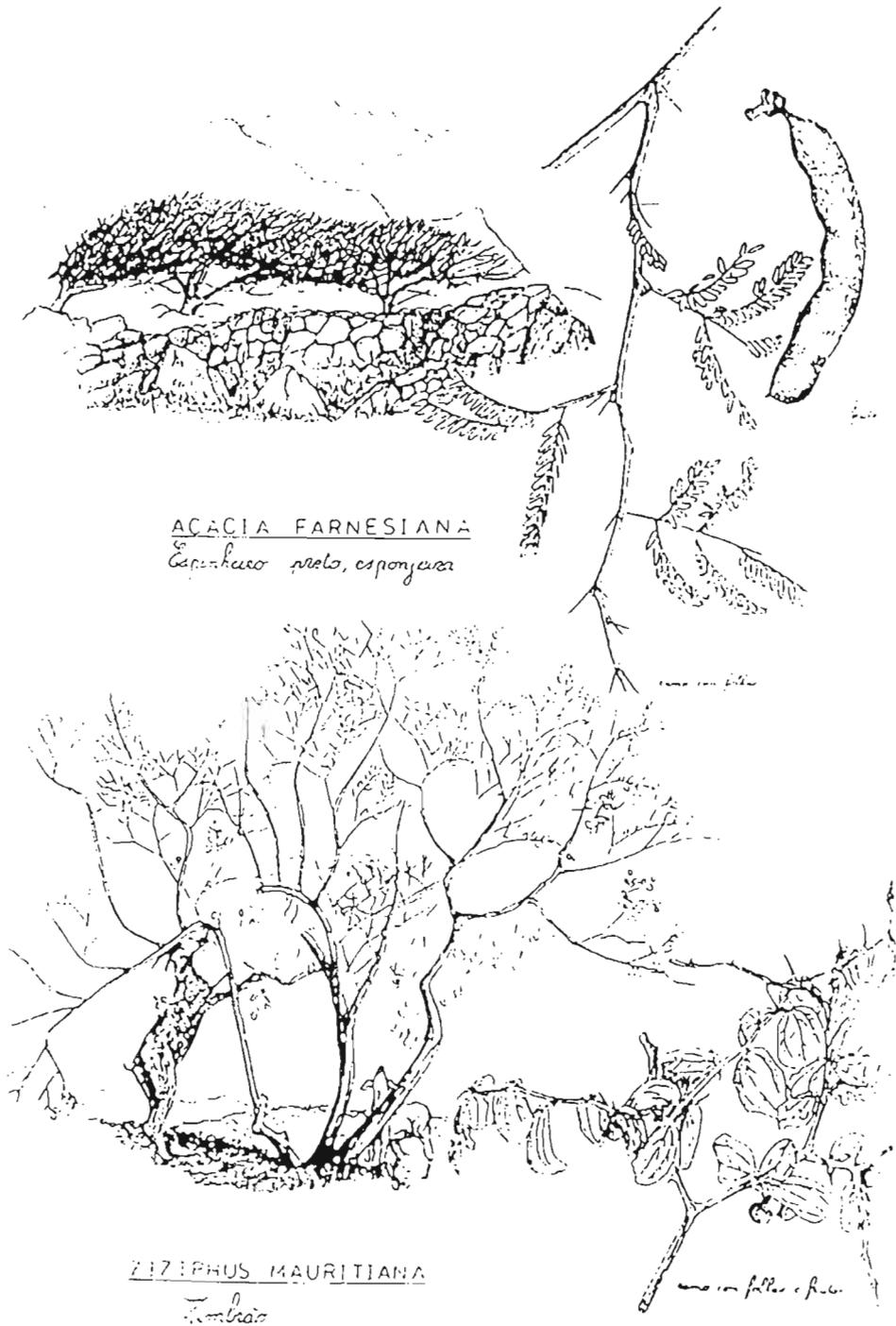


Fig. 1-11

(d'après Marc CHATELAIN)

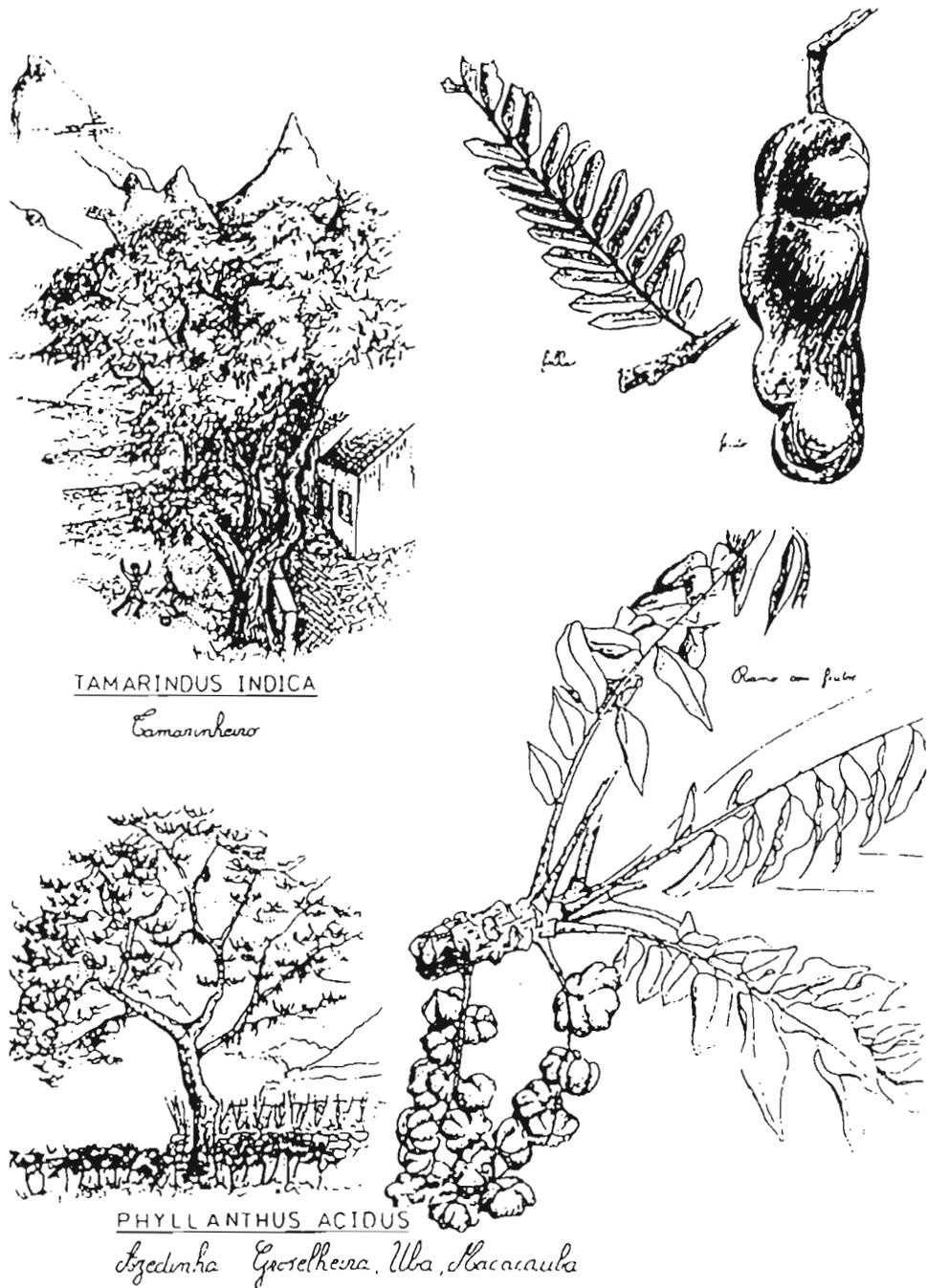


Fig 1-12

(d'après Marc CHATELAIN)

*rameaux, ils sont très caractéristiques. Le bois, excellent, est utilisé à São Vicente pour la confection de pipes".*

Nous avons volontairement limité cet inventaire à ces quelques espèces.. mais on ne saurait bien évidemment ignorer au niveau du paysage les rares fromagers ou baobabs, les nombreux palmiers et cocotiers, et sur le plan de la reforestation, les eucalyptus, pins et cyprès.

## 5.5 LES PLANTES CULTIVEES

Il s'agit d'une part de cultures vivrières au premier rang desquelles on peut citer le maïs qui forme depuis les premiers temps de la colonisation l'alimentation de base des habitants, complétée dans le plat national par "la cachupa", espèces de légumineuses : haricots, doliques, pois d'Angol. Le pois d'Angol ensemencé en début de saison des pluies devient un petit arbre, vivace pendant plusieurs années, et offrant son bois en complément de ses fruits. Il est originaire d'Inde Orientale où il est connu sous le nom de Cajan et a dû être importé vers le XVI<sup>ème</sup> siècle. Toutes ces cultures sont pluviales et subissent donc les aléas climatiques. Pour le maïs, semé avec les premières pluies de juillet ou août, la période critique correspond aux pluies attendues du mois d'août à la fin octobre ; une mauvaise répartition ou leur absence compromettent la récolte. Les famines sont d'abord dues à des greniers vides de maïs.

Parmi les plantes à tubercules, on relève l'importance des patates douces et du manioc ; la pomme de terre est peu cultivée. Citons encore les cucurbitacées alimentaires (courges et pastèques) ; les cultures potagères se développent avec la création de petits périmètres irrigués.

Sur le plan des cultures industrielles, citons l'importance passée du pourguère (*Jatropha curcas*) ou pignon d'inde dont les graines fournissent une huile utilisée dans la fabrication du savon. Un effort de réhabilitation de cette culture et de quelques plantations qui subsistent est aujourd'hui tenté. Les cocotiers ne constituent que de petites plantations à l'embouchure des ribeiras.

La culture des bananiers se développe dans les larges vallées alluviales de Santiago grâce à l'irrigation. La culture de la canne à sucre est traditionnelle dans toutes les îles où il y a un minimum de pluviosité ou d'irrigation possible ; elle fournit localement le sucre roux et le grogue (aguardente). La culture du cotonnier a été abandonnée, celle du tabac est marginale. La culture en altitude du café arabica correspond davantage à une tradition qu'à une vraie culture de rapport : le café du Cap-Vert était très estimé à Lisbonne. Sa culture représente l'intérêt de fixer les sols des ravins humides. Parmi les matières végétales cultivées à des fins industrielles, signalons celle du sisal qui continue à fixer les sols, mais n'est pas exploitée faute d'eau pour traiter les fibres.

## 6 CONCLUSIONS

Le développement aux îles du Cap-Vert repose sur le développement rural. Celui-ci dépend de la ressource en eau et de la conservation des sols. Les ressources hydrogéologiques ont fait l'objet d'un inventaire pratiquement exhaustif par le BURGEAP de 1969 à 1974 (Rapport de fin de mission 1974).

Le Ministère du Développement Rural (MDR) a confié en 1976 à la France une mission d'évaluation (financée par le FAC) devant préciser les conditions d'étude de la ressource en eau et de la protection des sols. Dans son rapport, la mission d'expertise (*op. cit.*) élevait, à l'issue de sa visite de l'archipel, différents points qui ont conduit aux choix des interventions de la présente étude. On note en particulier : *"Les périodes de sécheresse, même si elles durent plusieurs années de suite, ne cessent pas d'être cycliques et il ne semble pas que le processus actuel de désertification soit d'origine climatique. Ce processus s'accélère néanmoins depuis plusieurs décades (sic) par suite de l'augmentation de la population qui entraîne une extension des surfaces cultivées et un accroissement de l'effectif des troupeaux. L'arrêt de ce phénomène de désertification passe par la lutte contre l'érosion, qu'elle soit éolienne ou pluviale, et par conséquent par l'application de mesures de conservation des sols, telles que la culture en courbes de niveau et la limitation du nombre des animaux domestiques semi-nomades, en particulier des chèvres. L'étendue des cultures en terrasses dans les îles du Nord même si elle est due au fait que les habitants de ces îles sont,*

*en partie du moins, d'origine différente, et que le régime foncier y est sans doute mieux adapté, constitue pour l'ensemble de l'archipel un excellent exemple de défense contre l'érosion pluviale et permet de bien augurer l'avenir, à condition que toute la population rurale soit formée aux mêmes méthodes et accepte de se plier aux contraintes que nécessite la protection efficace des bassins versants"*.

Dans ses recommandations générales la mission "1976" écrit : *"Les observations hydrologiques dans les îles sont pratiquement inexistantes. Quelques stations hydrométriques ont bien été installées récemment dans le bassin expérimental de la Ribeira Seca, mais aucune n'a été étalonnée. Il est souhaitable qu'un service hydrologique voit rapidement le jour dans la République du Cap-Vert, mais ses résultats ne seront pas immédiats et le Plan Directeur des aménagements hydro-agricoles ne saurait les attendre. Par contre, des données climatologiques, et notamment pluviométriques, sont directement accessibles avec quelques opérations pouvant démarrer dans un délai raisonnable. Tenant compte de ces remarques, les recommandations de l'hydrologue peuvent être les suivantes.*

### *"- Etude générale des précipitations*

*On peut disposer actuellement de publications de totaux pluviométriques mensuels et annuels, ainsi que de valeurs de précipitations extrêmes, pour la plupart des stations exploitées ou ayant été exploitées dans les îles. C'est insuffisant :*

*- la plupart des opérations de bilan ou*

autres, notamment celles qui cherchent à évaluer les "surplus utilisables" actuellement rejetés à la mer, doivent se faire "à la crue" et exigent au moins une connaissance des pluies journalières et de la structure des épisodes pluvieux ;

- d'après les renseignements que nous avons pu avoir, aucune étude critique n'a été effectuée, aucune "homogénéisation" des séries chronologiques des précipitations n'a été entreprise.

La constitution d'un fichier en l'état d'abord, puis d'un fichier opérationnel, pouvant servir de base à toutes les études agronomiques ou forestières, aussi bien qu'hydrologiques et hydrogéologiques, semble devoir être inscrite en première urgence.

- Conservation des sols

Du point de vue de la conservation des sols, il faut distinguer entre :

- les îles au vent, au Nord, où il existe déjà des travaux antiérosifs sur les pentes et,
- les îles sous le vent, au Sud, où il existe seulement des travaux de correction dans les ravins.

Dans les îles au vent (tradition "Défense et Restauration des Sols" ou DRS) les principales cultures sont, comme dans le reste de l'archipel

- en sec : maïs, haricots,

- en irrigué : canne à sucre, bananes.

Les cultures en sec sont faites sur des terrasses méditerranéennes avec murs de soutènement en pierres sèches, généralement très bien faits. Malheureusement, ces travaux sont un peu anciens ; ils n'ont pas toujours été très bien entretenus et ils nécessitent des réparations et des améliorations. Mais les cultivateurs cap-verdiens, qui les ont déjà faits ou vu faire, sont tout à fait capables de les entretenir.

Les cultures irriguées sont faites le plus souvent dans le lit majeur des rivières, plus ou moins torrentielles, qui descendent de la montagne. Ces ravins possèdent un début d'aménagement au moyen de barrages en maçonnerie de pierres sèches. Malheureusement insuffisants en hauteur et en nombre, ces barrages sont presque tous atterris et ne peuvent plus jouer leur rôle de réserve d'eau. La mission a proposé d'établir et de gérer deux bassins versants expérimentaux, pour mesurer ruissellement et pertes en terre et pour tester la correction du lit torrentiel et l'aménagement des versants : plantations forestières sur les sommets et les pentes trop fortes, cultures en terrasses, ou tout au moins en courbes de niveau, sur les pentes cultivables.

Dans les îles sous le vent (sans tradition DRS) et en particulier à Santiago les pentes sont cultivées sans précaution aucune, ce qui entraîne évidemment une érosion pluviale importante bien que les sols volcaniques de l'île soient souvent assez stables. Mais les pentes sont très fortes et tout est cultivé avec le mélange classique : maïs, haricots.

*Des travaux importants de correction torrentielle ont été entrepris et se poursuivent avec des crédits F.A.O. Il sont bien faits, mais leur efficacité paraît douteuse, ou tout au moins insuffisante, du fait que les pentes de versants ne sont pas traitées.*

*Ici, il semble qu'un travail de formation soit nécessaire, car les propriétaires du sol paraissent n'avoir aucune idée des risques d'érosion. Il serait nécessaire de prévoir quelques périmètres de démonstration avec des méthodes simples de conservation.*

*Il serait nécessaire aussi :*

*1° d'interdire la culture des pentes trop fortes et de les réserver aux plantations forestières, d'autant plus que l'archipel manque totalement de combustible et qu'on brûle actuellement les racines végétales et les excréments des animaux domestiques ;*

*2° de limiter le nombre et le parcours des chèvres qui sont beaucoup trop nombreuses et qui détruisent systématiquement toute végétation.*

*La mise en défens des versants, par la reforestation en amont, la confection de terrasses et la culture en courbes de niveau..., est un PREALABLE INDISPENSABLE A TOUT AMENAGEMENT HYDRO-AGRICOLE DES RIBEIRAS. Cette lutte antiérosive, ainsi d'ailleurs que les aménagements hydro-agricoles, sera conçue et réalisée de l'AMONT vers l'AVAL.*

*- Les ressources en eau*

*Actuellement, une grande partie de l'eau utilisée, tant pour les besoins de la population que pour l'irrigation, est d'origine gravitaire (captage de sources, dérivation de cours d'eau superficiels, drains dans les nappes alluviales); des ressources complémentaires proviennent de puits, galeries de captage et forages.*

*Des améliorations sont possibles dans la mobilisation des ressources en eau :*

*La présence de sources côtières (Agua dos Angos à São Nicolau) laisse présager des pertes importantes en mer. Ces pertes doivent de même exister au niveau des nappes alluviales des lits des ribeiras. Est-il possible d'envisager leur captage et ces pertes sont-elles suffisamment abondantes et localisées ?*

*La mise en place de dispositifs de réglage des débits (vannes et serrements étanches) devrait permettre une régularisation des galeries de captage ou des galeries de drainage. C'est dans les vallées où les écoulements superficiels se maintiennent jusqu'à la mer, plusieurs mois par an, que ces régulations seront le plus efficaces.*

*Sur le plan de la recharge artificielle des aquifères, il s'agit de récupérer au maximum, en favorisant leur infiltration, les eaux de ruissellement qui se perdent actuellement en mer et dont le stockage en surface apparaît difficile sinon impossible. Les digues-barrages mises en place en travers des cours des ribeiras*

sont des éléments très favorables qui régularisent les rivières, ralentissent le flot des crues et favorisent l'infiltration ; cette action de construction de digues-barrages, dite de correction torrentielle, est à poursuivre et à intensifier de l'amont vers l'aval des ribeiras.

Pour les ouvrages d'épandage de crues dans le lit des ribeiras la technique du gabion semble préférable à la maçonnerie ou la construction en béton car :

- l'accroissement des volumes de superstructures est compensé par une réduction des fondations ;
- cette technique fait appel à une main d'œuvre abondante et peu qualifiée (main d'œuvre féminine) et s'intègre bien à des aménagements de longue haleine capables de rassembler dans une lutte commune une population sous-employée.

L'utilisation d'éoliennes pour le pompage de l'eau dans les puits alluvionnaires ainsi que pour le refoulement de cette eau sur les terrasses les plus accessibles, devrait permettre, à peu de frais, une mise en valeur de l'irrigation de nouvelles terres et l'implantation sur ces terrasses de cultures irriguées de rente (agrumes, bananiers).

Dans les conditions climatiques, semi-désertiques, qui règnent sur l'archipel, la conception de l'exploitation des eaux doit être conçue de manière à "gérer la pénurie" en réservant ces ressources aux besoins prioritaires : alimentation humaine et cultures vivrières irriguées.

Les orientations concernant la mise en valeur des ressources en eau peuvent se résumer ainsi :

- le premier objectif est de couvrir les besoins en eau potable.
- les ressources en eau devraient ensuite être utilisées en priorité pour la réalisation d'une agriculture irriguée qui puisse favoriser l'obtention d'une alimentation équilibrée de la population.

Dans cette optique, dès lors que le facteur limitant de la production agricole est l'eau, l'obtention du revenu brut global maximum, principal objectif, impose de rechercher le rendement maximal par m<sup>3</sup> d'eau et non par hectare irrigué, ce qui suppose :

- de s'orienter vers des cultures à faible consommation d'eau ou valorisant bien l'eau ;
- d'utiliser des techniques d'irrigation à forte efficacité permettant d'accroître le rendement au m<sup>3</sup> apporté".

Avec ce double objectif de recherche et inventaire des eaux souterraines d'une part, la Défense et la Restauration des Sols (DRS) avec mobilisation et utilisation des eaux, d'autre part, le MDR a défini avec la mission française un projet sur l'île de São Nicolau.

La pertinence du choix de São Nicolau est basée sur des conditions de développement agricole.

*difficiles et quelques aspects intéressants :*

- *une POPULATION HABILE, dure à la tâche et possédant une solide tradition d'aménagements antiérosifs des pentes par la construction des terrasses consolidées par des ouvrages de pierres sèches ;*
- *la POSSIBILITE DE DEVELOPPER CES SUPERFICIES IRRIGABLES (terrasses*

*alluviales des ribeiras et dans la vallée de Faja) après l'étude, l'inventaire et la mobilisation des ressources hydriques, tant souterraines que de surface ;*

- *la FAIBLE SUPERFICIE DE L'ILE permet de faire une approche globale des problèmes de mise en valeur et de concentrer les efforts sur cette île.*

## CHAPITRE II

# GENERALITES SUR L'ILE DE SAO NICOLAU



## GENERALITES SUR L'ILE DE SAO NICOLAU

Le choix d'études dans l'île de Sao Nicolau s'est accompagné de projets d'aménagements et d'amélioration du captage des eaux souterraines, dont la recherche, les forages de reconnaissance et d'exhaure ont été réalisés par le BURGEAP ; des équipes françaises de coopération et celles du MDR ont développé en aval les infrastructures d'alimentation en eau et les irrigations. Le projet hydrologie s'est trouvé intégré à l'ensemble du programme et les résultats ont été échangés entre les divers partenaires tout au long de l'étude.

La proposition d'action intégrée de la mission d'experts de 1976 concernait l'étude et la réalisation d'un aménagement type de bassin versant et tenait dans ces termes :

*"La mission hydrologie D.R.S. Aménagement Hydro-Agricole et Reforestation a retenu pour São Nicolau le projet d'action INTEGREE et PLURIDISCIPLINAIRE concernant des AMENAGEMENTS TYPES DE BASSIN VERSANT et le contrôle de l'efficacité de ces aménagements.*

*Après discussion avec les Autorités Gouvernementales et Locales, il ressort que l'action doit être concentrée sur deux aménagements types de bassins versants.*

- *Priorité 1 : Ribeira Brava*
- *Priorité 2 : Faja*

*Cette partie du projet mettrait en oeuvre :*

- *une étude hydrologique des bassins versants,*
- *la reforestation de la partie amont des bassins versants,*
- *la protection des pentes et versants par des ouvrages antiérosifs,*
- *la mise en place de digues-barrages pour l'épandage des crues, la rectification du profil en long des ribeiras et la recharge des nappes alluviales,*
- *la protection des berges,*
- *l'aménagement hydro-agricole par l'amélioration des procédés de captage des eaux, tant souterraines que de surface, et la mise en place d'une légère infrastructure permettant l'irrigation des terrasses alluviales et des terrasses immédiatement supérieures au lit des ribeiras,*
- *des techniques modernes d'irrigation à forte efficacité, permettant d'accroître le rendement au m<sup>3</sup> apporté,*
- *l'introduction de nouveaux matériaux végétaux (cultures maraîchères ...) et l'amélioration des cultures traditionnelles : manioc, agrumes, bananier ...*

*Ces aménagements types pourront être réalisés rapidement et feront l'objet d'un contrôle permanent pour tester l'efficacité des solutions*

*proposées. Il apparaît que ces aménagements tests constituent une indispensable étape pour acquérir les données de base nécessaires et pouvant être extrapolées aux autres bassins versants de l'île et de l'archipel ; c'est un PREALABLE à l'établissement de tout schéma général d'aménagement."*

Pour ce qui le concernait, l'ORSTOM devait centrer son intervention sur les études d'hydrologie de surface comprenant la mesure des précipitations, celle des écoulements et des matières transportées en suspension et l'installation d'une station météorologique à FAJA remise dès la première année au MDR.

## **1. APERCU GEOGRAPHIQUE DE L'ILE DE SAO NICOLAU ET DE SON AGRICULTURE**

L'île de São Nicolau est comprise entre :

- 16°29 et 16°41 de latitude Nord
- 24°01 et 24°26 de longitude Ouest

Elle offre une superficie de 343 km<sup>2</sup> et présente un allongement maximal de 45 km suivant l'axe est-ouest et de 25 km suivant l'axe nord-sud dans sa partie occidentale.

L'île est scindée en deux grandes parties, séparées par le plateau de Campo de Preguiça où se situe le terrain d'aviation de l'île.

- A l'est se trouve une partie allongée suivant l'axe est-ouest, dont les sommets

varient, pour la plupart, entre 300 et 600 m d'altitude. On trouve dans ce secteur de nombreuses caldeiras dominant des coulées en tables (mésas) plus ou moins ondulées, souvent transformées superficiellement en champs de cailloux.

- A l'ouest un ensemble plus élevé et inscrit sur un axe nord-sud offre un relief plus tourmenté (point culminant de l'île, le Monte Gordo avec 1312 m).

Les grandes coulées basaltiques issues de ce massif volcanique sont entaillées par de profondes ribeiras (vallées de Covoada, Ribeira Prata, etc.) D'autres vallées sont moins encaissées (Ribeira Brava et Ribeira Grande) et sont dominées par des pitons phonolitiques (Canto de Faja) ou des dykes filoniens (Agua das Patas).

L'élargissement de l'île dans la partie ouest est due à la présence de l'énorme stratocone volcanique dont le Monte Gordo constitue le point culminant et la chaîne nord-sud du Chão Benito l'extension méridionale de l'île.

Alors que la partie ouest de l'île est partagée entre un versant relativement humide -de Praia Branca à Vila da Ribeira Brava- et un versant désertique au sud de Préguiça à Tarrafal et l'extrémité occidentale de l'île, la partie est connaît une plus franche aridité sur les deux versants. Son versant nord et ses plus hauts reliefs ne connaissent qu'une très éphémère humidité en saison des pluies.





13AUG72 C N17-38/W024-05 N N17-37/W024-00 MSS 7 R SUN EL58 R2090 188-0289-A-I-N-D-IL NASA ERTS E-1021-11300-7 01

14025-00

W024-301

N017-001

W024-001



13AUG72 C N16-11/W024-27 N N16-10/W024-21 MSS 7 R SUN EL58 R2088 188-0289-A-I-N-D-IL NASA ERTS E-1021-11302-7 01

W025-001

W024-301

N015-301

Page précédente et ci-contre :

Deux clichés Landsat communiqués par la NASA montrant l'île de São Nicolau dans le canal visible pour deux situations différentes de nébulosité au cours du mois d'août de l'année 1972, année connue pour son déficit extrême de précipitations.

On remarque que même pour une nébulosité moyenne, les reliefs de l'île de São Nicolau arrêtent les nuages et déterminent une zone de beau temps dégagé qui se poursuit au sud sur plus de 150 km (13 août 1972).

Sur l'autre cliché, ci-contre, la couverture nuageuse est plus dense et l'effet barrière de São Nicolau est toujours bien net ; la structure nuageuse se déforme latéralement pour occuper progressivement la zone sous le vent de l'île.

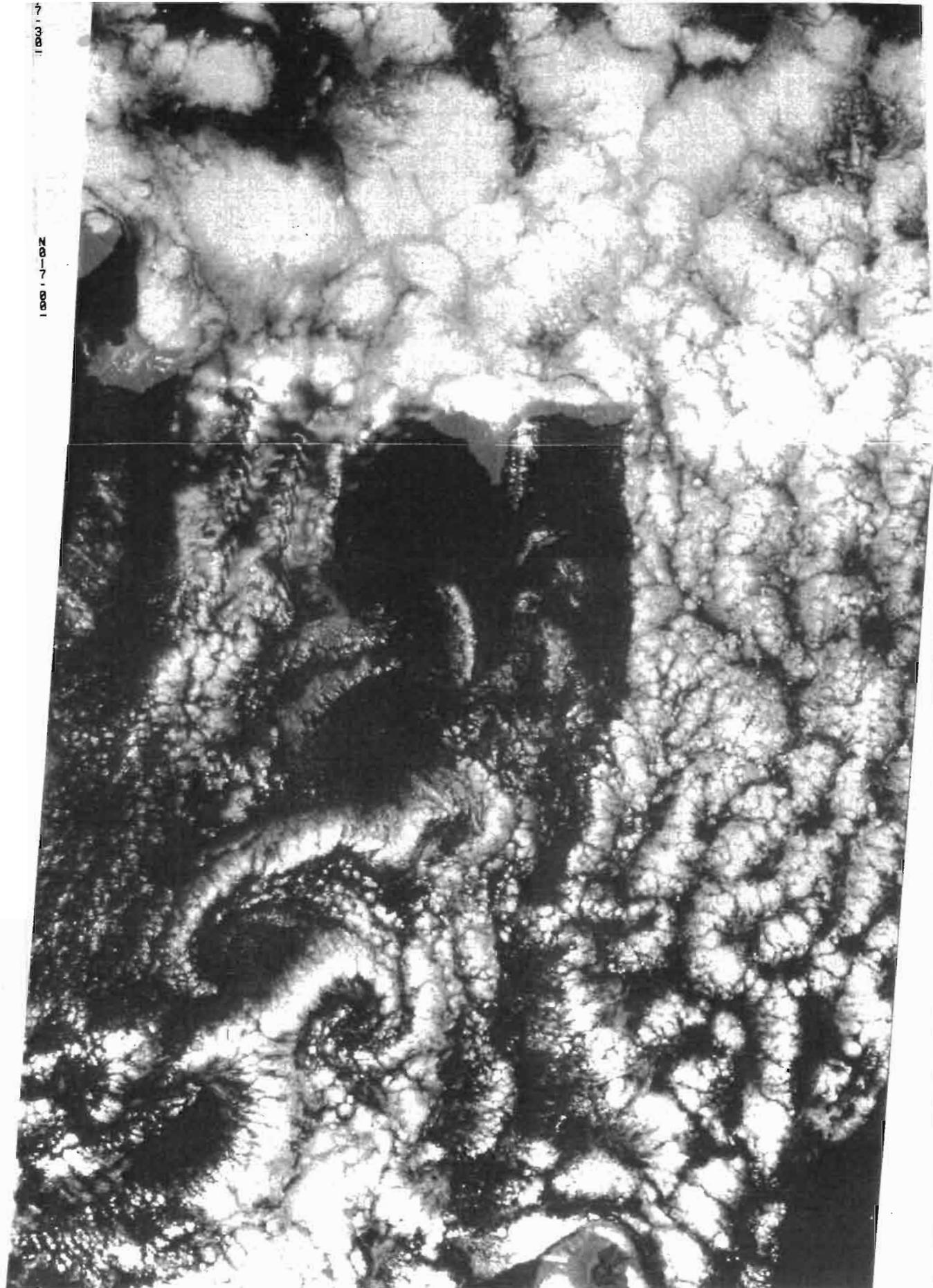
Au bas de la photo, vers la droite apparaît l'île de Fogo et son cratère caractéristique.

103.7

100.7-02

100.0-02

100.0-02



W025-001 N015-001 W024-301 W024-001  
 31AUG72 C N15-49/W024-29 N N15-48/W024-25 MSS 6 R SUN EL58 AZ099 188-0540-A-1-N-D-2L NASA ERTS E-1039-11303-6 01

W025-001

W024-301

W024-001

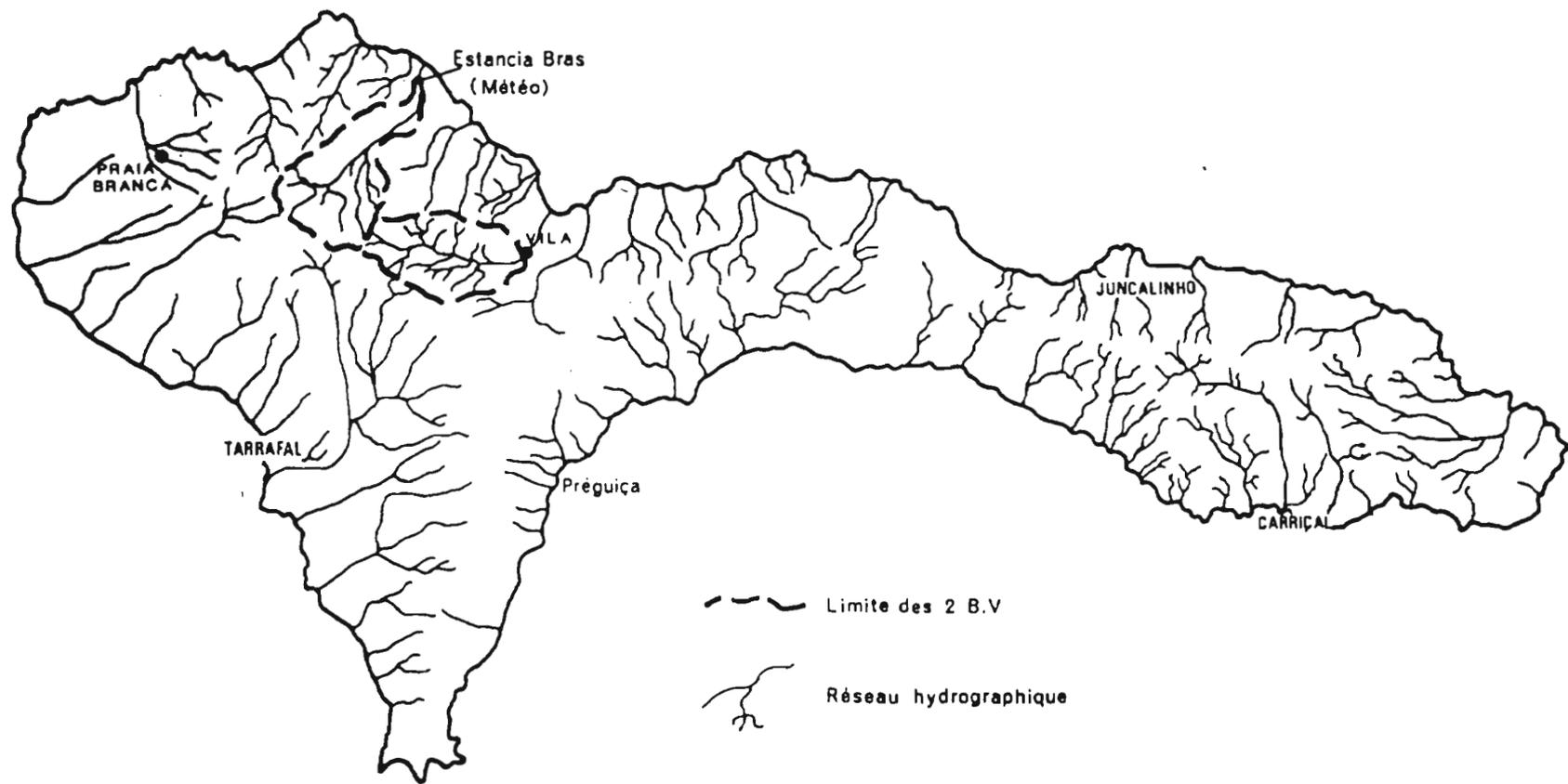


Fig.2-2

ILE de SAO NICOLAU

RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Avant que la sécheresse n'ait anéanti le cheptel, la partie est passait pour être une région d'élevage en altitude, (peu de cultures sèches), la partie humide occidentale ayant une tradition culturelle bien établie.

Les côtes sont essentiellement rocheuses, rigoureusement inabordable pour leur majeure partie, notamment sur la côte nord battue par les rouleaux de l'océan (pas ou peu d'abris pour le navigateur). En dehors de quelques dépôts de graviers ou galets en fonds de baies, les rares plages de sable noir se situent entre Tarrafal et la Ponta do Barril, et au débouché de la Ribeira Brava. C'est dans la partie ouest que se situent les principaux bourgs et villages : Vila da Ribeira Brava, capitale de l'île au nord, Praia Branca à l'ouest et deux petits ports de pêche : Preguiça sur la côte sud sur le méridien de Vila et Tarrafal, plus important, sur la côte sud-ouest, en sont les principaux. Dans les vallées, plus ou moins accessibles, il y a de nombreux petits villages ou hameaux et un certain habitat dispersé (Faja, Ribeira Prata, Covoada, Queimada, Carvoeiros, etc.).

Dans la partie est, un seul village important est à signaler sur la côte sud : Carriçal qui possède une usine de salaison de poissons. Des petits hameaux sont perdus dans la montagne comme Jalunga près du Mont Alto das Cabaças ou en bordure de la côte nord comme Juncalinho.

Sur le plan démographique, l'île de Sao Nicolau aurait suivant un recensement récent (1976) environ 15 500 habitants.

D'autres sources parlent de 12500 habitants (voir chapitres précédents) mais ont peut-être oublié l'émigration temporaire d'une partie de la population, ou correspondent tout simplement à une période beaucoup plus ancienne. La capitale, VILA da Ribeira Brava, compte 1800 habitants et TARRAFAL, port de pêche en a 1300. Dans la zone agricole, Faja compte 260 habitants, Covoada, 570, Cachaço 560, Canto de Faja 380 ; l'ensemble porte sur 2400 habitants.

D'après le BURGEAP (1982) la sécheresse aurait entraîné une émigration supplémentaire de 2000 personnes entre 1976 et 1980 ramenant la population de Sao Nicolau à 13500 habitants. Au sein de l'archipel, Sao Nicolau passe pour être une des îles les plus déshéritées particulièrement vulnérable aux conséquences de la sécheresse.

Les structures socio-économiques et socio-professionnelles qui ressortent de ce recensement présentent :

- une jeunesse importante ; 48 % de la population a moins de 18 ans,
- une population âgée assez importante ; 8 % a plus de 65 ans,
- 22 % de la population active potentielle est classée sous l'appellation de "trabalhadores" (travailleurs manuels, manoeuvres) employés pour beaucoup dans des activités d'intérêt général.

Il reste donc finalement assez peu de bras pour l'agriculture, mais il est vrai que les ressources agricoles ne suffisent pas à assurer tous les besoins des agriculteurs qui doivent rechercher des revenus d'appoint. En dehors des deux conserveries de Tarrafal et de Carrical et de quelques petits commerces, les seules possibilités de travail sont liées aux travaux d'infrastructure entrepris par l'Etat, et à la construction.

#### Le contexte agricole.

La zone nord - nord ouest connaît grâce à une meilleure exposition et à l'existence du Monte Gordo un régime pluviométrique plus favorable que dans le reste de l'île. C'est là que les ressources en eau, apparentes ou potentielles, paraissent les plus élevées ; c'est donc dans cette zone que s'est concentrée l'activité agricole qui regroupe les 2/3 de la population de l'île.

Plus précisément, l'essentiel de la production agricole est concentré dans la haute vallée de Faja, aux terres riches, mais dont les sequeiros sont soumis aux aléas des précipitations.

Ailleurs, les terres cultivables sont assez rares et situées dans des zones dépourvues actuellement de ressources en eau, comme par exemple à l'ouest de Praia Branca où une irrigation gravitaire à partir de Faja a été envisagée.

#### a) Cultures irriguées

N. KALFANE (1980) a résumé les principales

caractéristiques de la production agricole. A propos des cultures irriguées, il indique notamment que plusieurs estimations ont été faites :

- *"évaluation SCET à partir de détection sur le terrain et photo-interprétation : environ 100 ha.*
- *évaluation MDR - Cap Vert : 29 ha (source : "La production agricole nationale. Perspectives pour 1977-1978 - MDR - Praia - Juillet 1977).*
- *évaluation personnelle en se basant sur des estimations sur le terrain, les ressources en eau et leur variation dans le temps (sur la base de 40 m<sup>3</sup>/ha/j) ; nous sommes arrivés aux estimations suivantes :*
  - . *Surfaces aménagées : 64 ha environ*
  - . *Surfaces irrigables par les ressources apparentes : 20 ha environ*
  - . *Surfaces irrigables en 1956 : 110 ha environ*
  - . *Surfaces irrigables par les ressources actuelles en eau (juillet 1980) : 56 ha (captages + forages) : sous réserve de l'équipement de tous les forages existants et de ressources en sols adaptés aux ressources en eau.*

*Ce sont généralement de petits périmètres très dispersés sur alluvions et versants de vallées encaissées et aménagés en terrasses.*

*Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :*

- faibles superficies,
- dispersion dans l'espace,
- aménagement en terrasses sur sols d'éboulis de pente ou sols alluviaux - Terrasses souvent très étroites,
- parcellaire très morcelé (80 parcelles sur 2 ha à Queimada Aval ),
- pierrosité moyenne à très élevée. Nombreux accidents de terrain,
- nature des eaux : variable, parfois très chargées en sels et impropres à l'irrigation, (Amargosa),
- climat : protection relative contre les vents dans les vallées encaissées,
- associations culturales les plus fréquentes :
  - . canne à sucre (2/3)
  - . patate douce - manioc - banane (1/3)
  - . choux
  - . maraîchage rare à inexistant (choux - oignons - courges).
- pratiques culturales : traditionnelles : irrigation par cuvettes - faible technicité (houe) - fumure minérale inconnue - fumure organique insuffisante - traitements phytosanitaires nuls.

Entretien actuellement réduit à sa plus simple expression (sarclage - buttage).

- amenée de l'eau : le schéma classique consiste à stocker l'eau provenant d'une source, d'un captage ou d'une galerie drainante dans un réservoir à partir duquel part un canal principal (de 0,02 à 0,04 m<sup>2</sup> de section environ).

L'amenée d'eau à la parcelle se fait au moyen de "levadas" ou canaux en terre.

- le tour d'eau est régi par une espèce de "droit coutumier" (ici l'église catholique), il dépend du système foncier, de la surface et du "droit d'eau" dont dispose l'exploitant, deux tours d'eau peuvent souvent être espacés de 21 à 40 jours, ce qui expliquerait le système de culture consistant à aménager de profondes cuvettes pour très peu de plantes : ce système engendre un gaspillage d'eau, une mauvaise irrigation (perte par infiltration et évaporation) et une faible densité de plantes".

#### b) cultures sèches

Les cultures sèches sont généralement localisées au nord, nord-ouest de l'île (bassins de Faja et Ribeira Brava notamment).

Elles couvriraient d'après le MDR 1605 ha, dont :

- 1 200 ha en maïs-haricots
- 400 ha en patate douce
- 5 ha en café

N. KALFANE donne les précisions suivantes :

*"Les critères de classification des terres de culture portent sur différents points :*

- *pluviométrie : fonction de l'exposition et de l'altitude (< ou > 400 m),*
- *précipitations occultes : apparaissant dans les hauts de Faja à partir de 600 m, zone écologique convenant au café,*
- *altitude : (rupture à 400 m),*
- *pente : 2 à 20 % dans la plaine de Faja > 20 % sur la Ribeira Brava*

*Les principales associations culturales sont :*

- *café - pois d'Angola - maïs - haricots : zone "humide" d'altitude (500 m),*
- *pois d'Angola - maïs - haricots : zone semi-aride d'altitude (400 m)*
- *maïs - haricots : zone aride d'altitude > 400 m ou bien exposée au nord-ouest (> 100 m) (zone basse semi-aride),*
- *patates douces : culture de décrues dans les bas-fonds ou les fonds de Ribeiras - Culture sur les pentes d'altitude (Monte-Gordo ...).*

*Les perspectives de développement des cultures en sec sont limitées en raison du caractère aléatoire des pluies, de la pente souvent très forte en altitude et des faibles superficies, ainsi*

*que des habitudes alimentaires.*

*Les axes de développement pourraient porter sur :*

- *la régénération du café dans les zones favorables (10 à 15 ha maximum),*
- *l'introduction de variétés synthétiques ou composites de maïs à haut rendement et à cycle court,*
- *l'introduction de variétés améliorées de pois d'Angola et renouvellement des plantations.*
- *l'introduction de nouvelles spéculations (mil - sorgho) ou le développement de spéculations mieux adaptées à la sécheresse que le maïs (niébé) (alimentation animale - habitudes alimentaires)".*

En conclusion de ce rapide aperçu géographique, il apparaît trop clairement que le développement de l'île tient d'abord à ses ressources en eau. Celles-ci dépendent de deux points qui nous restent à aborder :

- le contenant ou le milieu géologique et son hydrogéologie, c'est-à-dire, la description des aquifères,
- le contenu ou l'origine de ces ressources, c'est-à-dire, le régime des précipitations.

Ces deux aspects font l'objet des prochaines pages (Chapitre II.2 et chapitre III).

## 2. GEOLOGIE ET HYDRO- GEOLOGIE DE SAO NICOLAU

### 2.1. ESQUISSE GEOLOGIQUE

La carte de la figure 2.2 propose une esquisse de la couverture géologique de l'île de São Nicolau. Celle-ci est malgré son aspect tourmenté et son allongement assez semblable sur le plan géologique à l'île de Santiago.

Sans rentrer dans le détail de l'histoire géologique proposée au chapitre I, on peut énumérer la succession suivante :

- + le complexe ancien (CA), peu étendu, se rencontre au centre nord de l'île et dans la vallée de la Ribeira Brava. Beaucoup de filons, série très altérée. Le CA correspond à une phase éruptive longue et diversifiée, s'étendant du Crétacé à l'Eocène.

- + la série marine du Flamengos (FI) est d'âge miocène et constituée de brèches marines jaunâtres ou verdâtres. Elle se rencontre à l'aval d'un grand nombre de vallées du nord de l'île. Son extension a été estimée à 70 km<sup>2</sup> par SERRALHERO et al (1979).

Le conglomérat bréchique (CB) est l'équivalent continental de la série du Flamengos, il affleure très peu.

- + une phase marine (LRi) présente des pillow-lavas bien conservés, associés à des tufs et des pyroclastes. Surtout présente

sur les côtes de la partie est de l'île et dans la basse vallée de Queimadas.

- + la plus grande partie de l'île est constituée par une très épaisse succession de coulées basaltiques (MPA) qui plongent vers la mer. Alternant coulées, tufs et brèches (surtout à la base de la série) ce volcanisme a dû se poursuivre sans interruption majeure entre Miocène et Pliocène.

- + une phase volcanique réduite, datée du quaternaire, et essentiellement explosive (Pi), constitue la partie culminante de l'île avec les volcans du Monte Gordo et de Praia Branca. On la trouve également dans la zone de Campo de Porto (Mont Bissau).

- + de faibles dépôts alluviaux se rencontrent dans les ribeiras. Dépôts de versants et colluvions s'étalent au pied des falaises du MPA sur les côtes sud ouest et nord de l'île.

En plus de ces dépôts volcaniques on note quelques dépôts calcaires fossilifères tertiaires intercalés entre des coulées basaltiques et des formations pyroclastiques (Carriçal, Castilhionne, Cha do Barril) (SERRALHERO, op. cit.).

### 2.2. INTERPRETATION GEOMORPHO- LOGIQUE ET GEOSTRUCTURALE

Celle-ci est due pour l'essentiel à A. FOURNET (communication orale). L'interprétation a été faite dans une optique d'histoire de la mise en place des formations et de leurs déformations tectoniques d'une part, et



Partie orientale de l'île de São Nicolau :

1. Région du Mt Bissau.
2. Village de Juncalinho, au pied du rebord de la Caldeira orientale effondrée en mer. Noter l'opposition entre les côtes sud et nord : la côte nord, au vent, est battue par l'alizé.

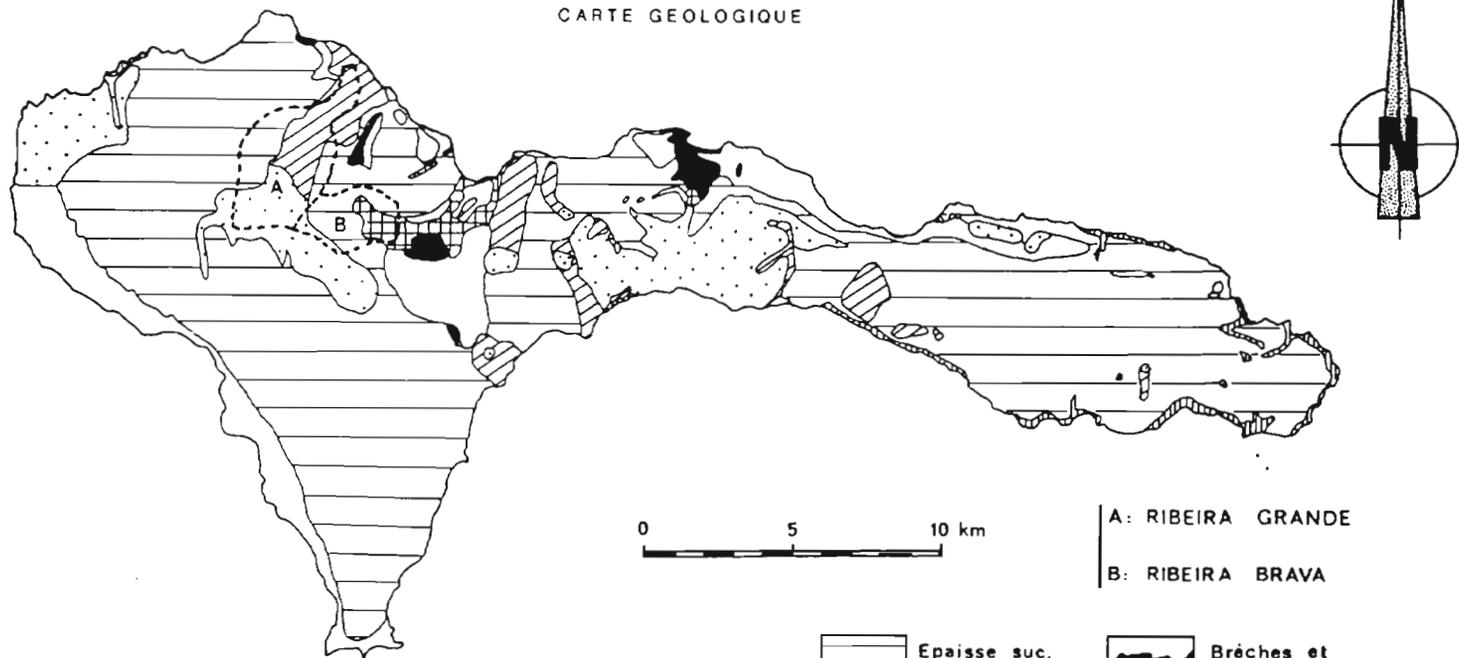
(Photos J.C. OLIVRY).



Fig. 2-3

# ILE DE SAO NICOLAU (Cap vert)

CARTE GEOLOGIQUE



0 5 10 km

A: RIBEIRA GRANDE  
B: RIBEIRA BRAVA

Dépôts de versants

Coulées récentes

Pyroclastes

Epaisse suc. de coulées

Brèches et laves marines

Laves sous marines

Complexe ancien

d'identification d'aquifères potentiels sur la plan hydrogéologique d'autre part. Il a ainsi distingué trois zones principales :

#### **A. La région de JUNCALINHO (partie orientale de l'île)**

La ligne de crêtes qui domine le versant côtier nord de l'île est constituée par des pyroclastes formant la muraille d'un immense cratère englouti dont le centre se situe dans l'axe de la baie de Juncalinho. La disposition verticale de ces rochers permet aux eaux météoriques de tarauder l'affleurement, conférant à cette muraille un aspect karstique. Le flanc nord de cette muraille est recouvert d'éboulis et colluvions s'étendant jusqu'en bord de mer. Il ne s'agit pas de coulées volcaniques récentes, mais de dépôts de versants revêtus d'un sol plus ou moins ferrugineux, brun ou rouge, du quaternaire moyen et de l'Holocène.

La terrasse côtière de Juncalinho se situe en falaise au-dessus de la mer, sans plages. Elle présente quelques petits appareils volcaniques récents sortis dans la bordure de la caldeira de l'ancien volcan englouti. Leur disposition correspond à celle des autres appareils récents de l'île.

Le flanc sud de la muraille est formé par l'empilement des grandes coulées de laves émises autrefois par la caldeira engloutie. Plus précisément, il s'agit d'épanchements sub-horizontaux émis par une lèvres d'écoulement en milieu sous-marin d'après A. FOURNET. Ce versant construit jusqu'au quaternaire moyen

a été creusé, recouvert de colluvions et présente des édifices volcaniques aériens de taille moyenne plus récents, et de plus petits avec petites coulées plus récentes encore.

Sur le plan hydrologique, la muraille de l'ancien volcan constitue un réservoir d'eau profonde jusqu'à l'interface marin ; l'aquifère est alimenté par son affleurement karstifié et aussi par les précipitations infiltrées dans les colluvions du versant sud.

Le grand volcan à caldeira engloutie aujourd'hui a fonctionné jusqu'au quaternaire moyen inclus. C'est à cette époque qu'il s'est éteint et a été démantelé et englouti. De ce fait la partie orientale de l'île a basculé en glissant vers le sud, comme si le volcan s'était ouvert, le long d'une faille nord-sud visible à l'ouest de l'aérodrome de Preguiça. Il en est résulté une nouvelle activité volcanique mentionnée au flanc sud et à l'intérieur de l'ancienne caldeira. Le glissement vers le sud a relayé ces nouveaux appareils par de plus récents. Le basculement de l'île vers le sud est apparent dans la plate-forme côtière sud en grande partie engloutie dans la mer.

#### **B. Zone centrale de l'île (Cabeça de Vaca - Monte Cacador)**

Cette zone ouest de la partie orientale correspond à la zone de jonction entre l'ancien volcan du Monte Gordo resté en place et l'ancienne Caldeira engloutie étudiée ci-dessus. Il s'agit donc d'une zone de torsion avec deux directions de fractures :

- une direction N-NW - S-SE de cisaillement, l'île orientale basculant vers le sud par rapport à l'île occidentale restée d'aplomb ; c'est la fracture de l'aérodrome de Prêguiça ; c'est aussi celle définie par la crête de Chao Bonito-Calejao.
- une direction SW-NE de torsion est celle qui va du Monte Joachim Matias à Belem.

Cette direction est jalonnée de volcans d'âge postérieurs aux caldeiras anciennes (volcan Bissau). Une deuxième ligne de volcans parallèles à celle-ci va de la Caldeira de Prêguiça aux Caldeiras Cacador et Mesa. Enfin, un troisième alignement jalonne le flanc nord du premier.

Le substratum est constitué des coulées de laves anciennes, démantelées et arrosées en surface et souvent recouvertes par les nouveaux édifices volcaniques. On a coexistence d'affleurements anciens et colorés en brun-rouge, griffés par l'érosion, et de coulées récentes, mais limitées au flanc nord et sur des lignes de torsion.

Dans les coulées anciennes, la présence de nappes profondes n'est pas exclue. En surface, aucune structure ne constitue d'aquifère notable.

La région de Campo da Prêguiça continue à l'ouest la zone de distension et de torsion au contact des deux grands appareils volcaniques de l'île.

Le site du terrain d'aviation est le lien central de la fracturation entre les lèvres de la crête Chao Bonito Calejao et de Agua Galhana - Agua Amargosa.

Le site est comblé par des colluvions issus de la crête Bonito-Calajao, avec côté oriental les coulées de volcans récents. La surface de la plaine appartient au quaternaire moyen.

### C. Le volcan principal de l'île occidentale (Monte Gordo)

Toute la zone occidentale est constituée par un volcan primitif qui a donné naissance à l'île et dont le cratère central est entouré de coulées de laves sub horizontales.

La zone nord comprend le cratère central avec comme pour le volcan oriental sa muraille à texture verticale qui est un réservoir d'eau potentiel au moins jusqu'au niveau de la mer.

Mais le volcan est coupé en deux par une faille ; la partie nord en voie d'effondrement est démantelée par l'érosion. Pour A. FOURNET, le gonflement du volcan a entraîné l'éclatement de son cône par failles concentriques. Ces failles entaillées par l'érosion ont évolué en vallées dont celles qui font l'objet de cette étude.

Dans deux de ces vallées du nord, il y a eu des coulées de laves issues de volcans récents situés sur la faille qui casse le creux du volcan d'ouest en est. Parmi ces volcans récents, le Monte Gordo et son énorme production pyroclastique.

La muraille du cratère principal est un réservoir aquifère permanent. Les vallées constituent le site des nappes transitoires interstratifiées dans les coulées profondes et même les coulées récentes superficielles.

La zone sud occidentale, notamment entre Terrafal et Preguiça, correspond à la partie sud du volcan primitif au sud de la faille ouest-est qui l'a cassé.

Cette zone a conservé, malgré les failles rayonnantes du cône éclaté, la surface des dernières coulées, des laves anciennes aux laves quaternaires. De tels aquifères n'intéressent que des nappes de transit dans un milieu de dépôt sub-horizontale.

De cet examen, il ressort que l'île São Nicolau, comme tout l'archipel du Cap-Vert, est entraînée dans le déplacement rotatif de la plaque africaine et est traversée par les faibles transformations du Rift atlantique. C'est l'une de ces failles qui a cassé en deux le volcan primitif oriental dont la moitié nord s'est abîmée en mer. Elle casse encore le volcan occidental et c'est sur son parcours relatif actuel que sont sortis les volcans adventices récents, dont l'alignement par rapport aux anciens volcans et à leurs fractures, montre comment se déplace cette partie de la plaque africaine.

### 2.3. HYDROGEOLOGIE SOMMAIRE

Déjà un peu évoquée dans l'interprétation qui a été faite sur le plan de la géomorphologie, l'hydrogéologie peut être précisée rapi-

dement dans ses grands traits telle qu'elle a pu être définie par les études du BURGEAP.

On peut caractériser les différents aquifères :

- La série de base (complexe ancien et Flamengos CA + CB + FL) constitue le substratum imperméable pour toutes les autres formations. La série des Flamengos expliquait sans doute la présence de cours d'eau pratiquement pérennes dans les ribeiras da Prata et dos Camaroes.

- La série intermédiaire (LRi, MPA, m) constitue le principal réservoir aquifère. Plusieurs facteurs, comme sa forte épaisseur, le bon coefficient d'emménagement, sa perméabilité moyenne qui évite une vidange trop rapide, et son alimentation élevée (hauts reliefs les mieux arrosés), lui permettent de tenir ce rôle.

- La série récente de pyroclastes constitue une très bonne zone d'infiltration, mais sa forte perméabilité entraîne une vidange très rapide de l'aquifère. Les débits des sources situées à l'exutoire de telles formations subissent de fortes fluctuations ; les coulées basaltiques récentes sont fissurées et constituent un bon aquifère.

- Les alluvions, d'extension très réduite, ont une forte perméabilité et se vidangent très vite. Ils ne constituent que de faibles réservoirs aquifères. A Ribeira Brava on a une galerie drainante dans les alluvions. La nappe alluviale était pratiquement asséchée en 1972.

Les ressources connues en eau étaient supérieures à 4 800 m<sup>3</sup>/jour en 1956. En 1972, elles s'étaient abaissées à moins de 1 800 m<sup>3</sup>/jour, et ont continué à décroître dangereusement.

Cette diminution considérable, la plus forte enregistrée dans l'archipel, s'explique certes par l'exceptionnel déficit pluviométrique mais aussi par les sites hydrogéologiques des différentes sources et captages.

En effet, on ne retrouve pas ici le schéma de Santiago, où des sources, situées au contact du CA et de la série intermédiaire apparaissent comme les exutoires principaux de grands systèmes aquifères :

- dans les ribeiras de Queimada et de Brava, les sources sont bien situées à ce contact, mais ce ne sont que des trop-plein de réservoirs qui se vidangent soit vers la basse vallée de Faja, soit vers le versant nord du mont Caramujo ;
- les sources de Praia Branca et de Ribeira da Prata et dos Camaroes, bien que probablement proches du substratum, ne représentent qu'une partie restreinte des écoulements globaux dont le reste se perd en mer. Elles sont de ce fait très sensibles à une variation des niveaux piézométriques en altitude ;
- quant aux sources d'altitude du versant sud-ouest du Monte Gordo, qui apparaissent dans des lapillis au contact de tufs assez bien cimentés, d'une part

elles sont liées à un réservoir d'extension limitée, d'autre part leur substratum n'a sans doute pas une continuité et une étanchéité suffisantes pour éviter qu'un écoulement assez important subsiste en profondeur vers l'aval.

Aussi, la source la mieux régularisée est-elle la source littorale de Agua dos Anjos, dont le débit n'a pas diminué de moitié, d'avril 1956 à avril 1972, alors que celui des sources du Monte Gordo était divisé à peu près par cinq.

On peut donc penser que contrairement aux débits qui viennent actuellement à la surface, le débit total des écoulements souterrains ne subit que des variations interannuelles relativement limitées.

Le BURGEAP estime à plusieurs milliers de m<sup>3</sup>/jour les pertes en mer entre Praia Branca et la vallée dos Anjos, et à 500 m<sup>3</sup>/jour les pertes vers le sud-ouest et le mont Caramujo. Il est vrai que le système aquifère plonge directement en mer.

## 2.4. LA MISE EN VALEUR DES EAUX SOUTERRAINES

Elle est le fait d'une tradition séculaire sur laquelle nous ne nous étendrons pas (longue galerie de captage des eaux d'Agua de Torna au flanc sud du Monte Gordo vers VILA da Ribeira Brava). On doit cependant citer l'important travail réalisé par le BURGEAP à Sao Nicolau de 1977 à 1985, travail de réhabilitation de points d'eau, de recherche et d'exploitation de nouvelles ressources. Le

BURGEAP relate ainsi son intervention :

a) Les forages :

*"Une sondeuse à air comprimé, capable de forer au diamètre de 150 mm (6") jusqu'à 150 mètres de profondeur, et montée sur chenilles pour permettre l'accès aux sites les plus difficiles, fut acheminée de France à São Nicolau en 1977.*

*Sur des sites déterminés conjointement par l'administration et la mission, et à la suite d'études hydrogéologiques détaillées effectuées par les hydrogéologues du BURGEAP, l'atelier de sondage, mis en oeuvre par une équipe cap-verdienne dirigée par un maître sondeur expatrié, a réalisé, entre septembre 1977 et décembre 1980 :*

- dix forages pour l'alimentation en eau potable des villages ; capacité : 500 m<sup>3</sup>/jour ;
- dix-neuf forages destinés à l'irrigation et à l'abreuvement du bétail ; capacité : 1 500 m<sup>3</sup>/jour ;
- seize forages de reconnaissance géologique, dont une partie sur le tracé des galeries ;
- quatorze piézomètres côtiers destinés à contrôler l'évolution de la qualité des eaux, et à contrôler l'entrée d'eau de mer dans les formations aquifères, en cas de surexploitation.

*La plupart de ces forages ont été exécutés dans des conditions particulièrement délicates en*

*raison des difficultés d'accès, de la grande profondeur de l'eau, et de la mauvaise tenue des terrains traversés, qui a nécessité de nombreuses cimentations et l'emploi de produits spéciaux (mousses).*

*Depuis juillet 1979, date à laquelle BURGEAP a mis sur pied un appui technique et logistique permanent à partir de Paris, assurant aussi bien l'approvisionnement régulier que l'acheminement en urgence de certaines pièces détachées, l'atelier de forage n'a pas été immobilisé plus de 48 heures par des pannes.*

*Certains de ces forages constituent des records pour ce type de matériel et d'ouvrage : à Faja (2 560 habitants dans la vallée), plusieurs villages, situés entre 180 m et 500 m d'altitude, qui devaient s'approvisionner sur le littoral, à deux ou trois kilomètres de distance, à la source d'Anjos, sont désormais alimentés par un forage de 195 mètres, d'où l'eau est refoulée de 170 mètres de profondeur.*

*A l'issue de trois années de travaux, l'équipe cap-verdienne est en mesure de faire fonctionner l'atelier de forage".*

b) Le captage des sources

*"Parallèlement à la campagne de forage, la mission a entrepris, à partir de 1979, la création ou l'amélioration de captages de sources ou de petites nappes, situées à la base des alluvions dans le fond des ravins.*

*Orientée sur des secteurs généralement inaccessibles à la sondeuse, cette action visait à*

*régénérer des ressources en voie de tarissement, dans le but de revivifier des cultures irriguées menacées de disparition, et d'améliorer l'alimentation en eau de la population.*

*Avec de la main-d'œuvre locale, encadrée par un chef de chantier cap-verdien spécialiste du minage, 18 captages ont été créés ou améliorés en deux ans, par l'aménagement de galeries ou de tranchées drainantes, apportant un surcroît d'eau global de 250 m<sup>3</sup>/jour en étiage, qui a permis de remettre cinq à six hectares en culture.*

*La modicité apparente de ce résultat traduit mal l'intérêt essentiel de cette opération, qui a permis de maintenir sur leurs terres des communautés de cultivateurs menacées par la sécheresse.*

*De plus, son rendement est particulièrement favorable : on verra plus loin que le prix de revient de chaque mètre cube d'eau ainsi récupéré est l'un des plus bas de l'ensemble du projet.*

*Parmi ces captages, l'un des plus intéressants est sans conteste celui de Maria Palinha, à l'amont immédiat de Vila da Ribeira Brava :*

*Un examen géologique détaillé du site de la source de Maria Palinha (50 m<sup>3</sup>/jour) nous avait convaincu qu'il existait, parallèlement à la vallée, un écoulement souterrain masqué par une coulée volcanique récente.*

*Après avoir vérifié cette hypothèse par quatre sondages de reconnaissance, une galerie de 30*

*mètres de longueur fut foncée vers la base de la coulée. Elle a permis de doubler le débit qui s'écoule vers Vila da Ribeira Brava, et d'améliorer immédiatement l'alimentation en eau du cheflieu de Sao Nicolau.*

*Si l'adduction de Campo de Preguiça à Vila Brava est réalisée, les eaux captées à Maria Palinha permettront d'irriguer à nouveau les jardins, actuellement abandonnés, aux portes mêmes de Vila.*

*Première galerie de grand diamètre foncée dans le basalte (trois mois de travail), la galerie de Maria Palinha a permis d'entreprendre la formation d'une équipe de mineurs qui s'est progressivement familiarisée avec le matériel et les difficultés du travail en souterrain. En l'absence de cette étape préliminaire, il aurait été difficile d'envisager la réalisation de la galerie de Faja, qui devait atteindre 2 200 mètres de longueur".*

#### *c) La galerie de Faja*

*"Située au nord-ouest de Sao Nicolau, la Vallée de Faja constitue un site géologique remarquable, caractéristique de la morphologie des régions volcaniques.*

*Une vallée ancienne, profondément entaillée par l'érosion, et dans laquelle s'étaient déposés des éboulis et des alluvions, a été comblée, "fossilisée" en quelque sorte, à la suite d'une phase d'activité volcanique récente, qui y a provoqué l'empilement d'une succession de coulées basaltiques sur une grande épaisseur. Ainsi, l'étroite entaille fut transformée en un*

plateau surélevé de près d'un kilomètre de largeur, la vallée de Faja, fortement inclinée vers la mer.

La nappe alluviale de l'ancienne vallée continue cependant à s'écouler sous 150 à 250 m de couverture basaltique, pour déboucher en mer, à la source littorale d'Anjos, au pied d'une falaise de plus de 50 mètres de hauteur.

Dans cette structure particulière, reconnue dès 1969 et confirmée par une campagne de prospection électrique, trois forages de reconnaissance, réalisés en 1979, permirent de vérifier l'existence et la qualité des formations aquifères à 180 mètres de profondeur.

Les ressources de cette nappe profonde ont été estimées à 2 500 m<sup>3</sup>/jour.

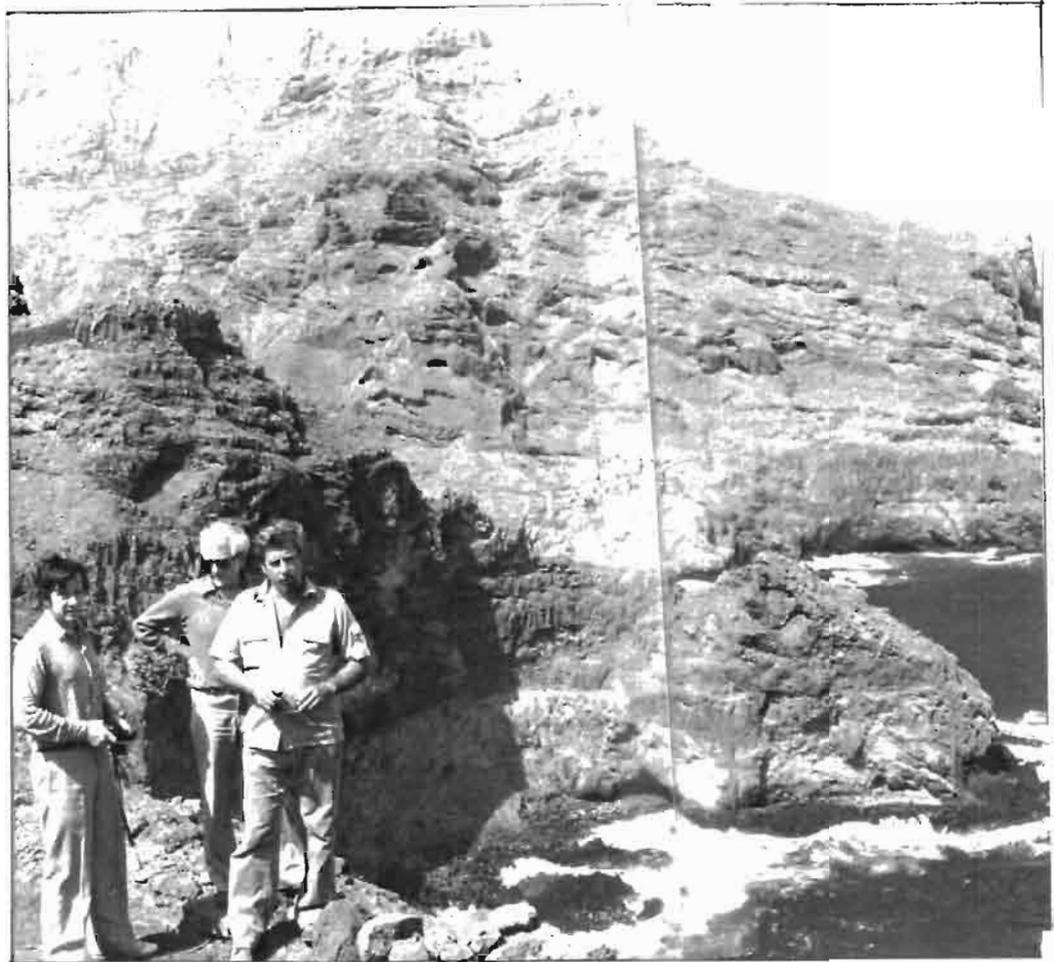
Il se trouve qu'à l'aval, au-dessous de l'altitude 270, la vallée de Faja possède les meilleures terres cultivables de Sao Nicolau, qui s'étendent sur plus de 100 hectares d'un seul tenant. Il était donc possible d'irriguer une partie de ces terres en allant chercher l'eau par galerie au fond de la vallée fossile, à environ deux kilomètres à l'amont, où la nappe se situe vers la cote 300 ; ainsi l'eau captée s'écoulera d'elle-même par gravité jusqu'aux cultures, alors que des forages auraient nécessité de la pomper (à grands frais) à 200 m de profondeur.

Les calculs effectués au stade de l'avant-projet ont montré qu'en dépit de l'importance de l'investissement et de la durée des travaux (plusieurs années) le prix de revient du mètre cube d'eau est parfaitement compatible avec l'irrigation, les dépenses d'exploitation étant pratiquement nulles.

La galerie de Faja a été achevée en 1985 ; devant produire 1 000 à 2 000 m<sup>3</sup>.jour<sup>-1</sup>, elle permettra d'irriguer 25 à 50 hectares des meilleures terres de l'île, accroissant de manière significative la superficie des cultures permanentes de Sao Nicolau.

Cette opération sert en même temps de banc d'essai, et ouvre l'avenir : la multiplication des galeries de captage dans toutes les îles hautes de l'archipel sera en effet, dans les prochaines années, le principal moyen de développement des cultures irriguées".

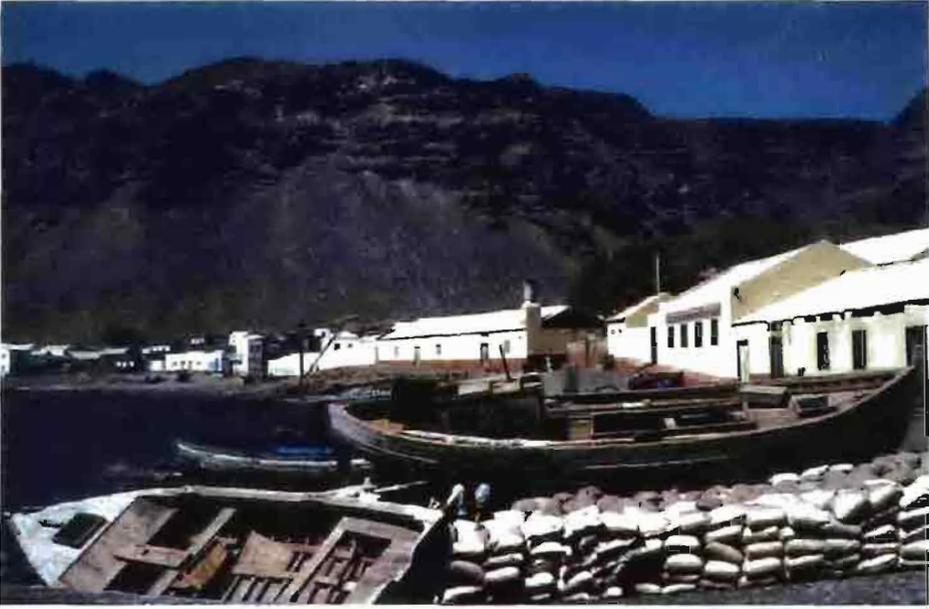
En conclusion, les ressources exploitées aux îles du Cap-Vert tombées à 1 450 m<sup>3</sup>.jour<sup>-1</sup> à l'étiage 1980 ont été augmentées de 2 250 m<sup>3</sup>.jour<sup>-1</sup> par le projet (forages et captages) et de 1 500 m<sup>3</sup>.jour<sup>-1</sup> par la galerie de Faja. Cela porte à 5 200 m<sup>3</sup>.jour<sup>-1</sup> le débit exploitable à Sao Nicolau pour autant que les ressources renouvelables correspondent bien aux précisions faites par BURGEAP (1974).



Ci-dessus : Côte nord de l'île ; vue du hameau de R. FUNDA au flanc des pics de Cachacinho ; de gauche à droite J. Ch. FONTES, J. COLOMBANI, J.C. OLIVRY.



Ci-dessus : la côte nord de l'île ; en bas à gauche, débouché de la R. Brava ; en haut, débouché de la R. Secca. les lignes de murettes témoignent d'une distribution ancienne de l'espace foncier et délimitent généralement des zones réservées antérieurement à l'élevage. (Photo Olivry).



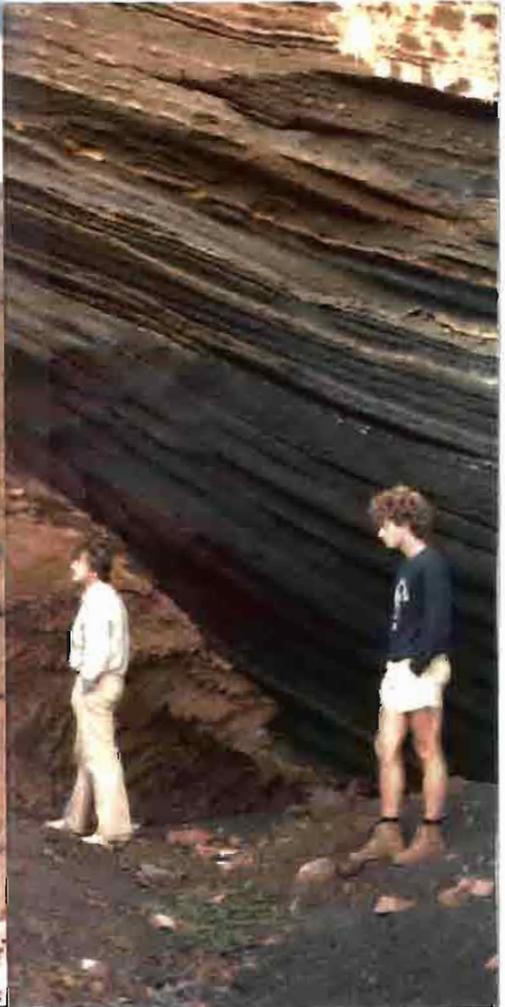
page précédente :

- 1 : le "port" de Tarrafal sur la côte sud-ouest.  
(Photo Lérique).
- 2 : Ensemble du village de Tarrafal vu vers l'est.  
(Photo Lérique).
- 3 : Vue d'ensemble de la côte sud-ouest depuis la Punta do Barril ; à l'horizon, le Chao Benito.

Ci-contre : Le versant sud du Monte Gordo (1313 m)      1  
2   3

- 1 : vue vers l'est du hameau d'Ortelao sur éperon de basaltes et des couches de produits pyroclastiques.
- 2 : le sommet du Monte Gordo accrochant les nuages sur son versant nord et entaille d'érosion dans la série de couches de cendres, lapillis et pouzzolanes.
- 3 : détail de la succession d'éruptions pyroclastiques récentes.

(Photos J.C. OLIVRY).





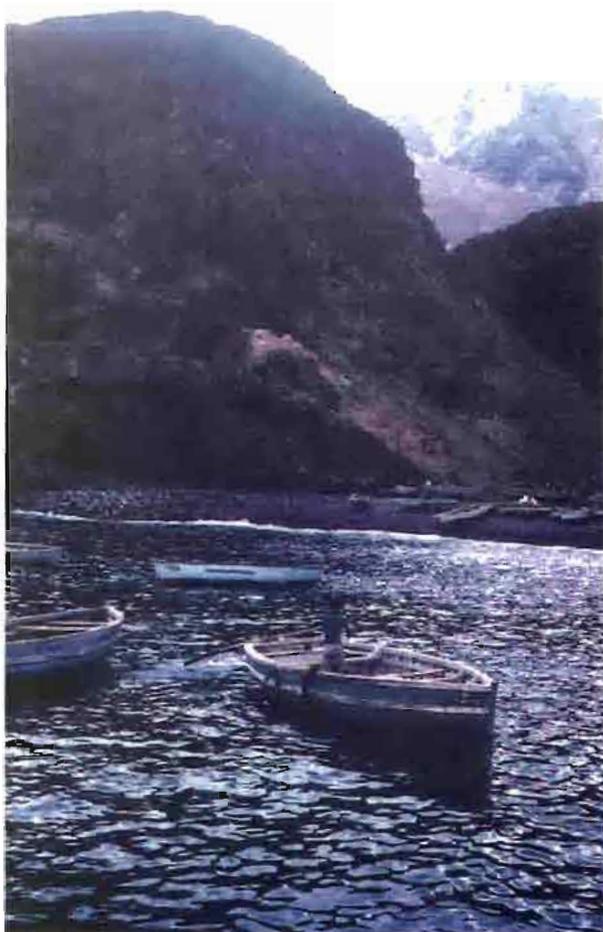


Quelques jardins sur la Ribeira Brava en aval de Vila.  
(photo J.C. Olivry).



Ci-dessus : le lit de la Ribeira Brava et son débouché sur la côte Nord.





Baie de Preguiça



L'attente à la fontaine principale de Vila da Ribeira Brava.

"Pillow-lavas" (laves en oreillers témoignant d'épanchements volcaniques sous-marins) présentés par A. de SOUZA FREDERICO, dit "Fuba", Directeur du M.D.R. à São Nicolau.



(Photos J.C. Olivry).

page ci-contre :

Vue de la partie orientale de l'île de Sao Nicolau depuis le Monte Gordo.

Les écueils de la Côte Nord au débouché de la R. Prata

La vallée de Ribeira da Brava, vue de la route Cachaço-Cabecalinho. (Photos J.C. Olivry).





## CHAPITRE III

# LE REGIME DES PRECIPITATIONS A SAO NICOLAU



# LE REGIME DES PRECIPITATIONS A SAO NICOLAU

## 1. GENERALITES

Faut-il rappeler que la ressource en eau, c'est d'abord celle venue du ciel ? et que les bilans de son "devenir" -le travail de l'hydrologue- supposent qu'elle soit bien connue ?

Il était donc inconcevable de faire une étude des mécanismes hydrologiques observables à São Nicolau sans connaître dans le détail les mécanismes des précipitations.

Mais sur une aussi courte période d'études, il n'était pas possible de déterminer les caractéristiques des régimes pluviométriques. Ceux-ci nécessitent pour être bien connus une longue période d'observations. Même si elles sont de durée, de densité spatiale et de qualité très variables, suivant les postes et les îles, ces observations existent. L'ORSTOM a pu - à l'occasion de travaux qui lui ont été confiés parallèlement aux études de São Nicolau - procéder à la collecte de l'information pluviométrique sur l'ensemble de l'archipel. J. CALLEDE (1982) a réuni l'ensemble des observations effectuées depuis l'origine sur toutes les stations pluviométriques dont les relevés ont pu être retrouvés en archives.

C'est à partir de ces données de base que nous proposons ici une étude des précipitations dans l'île de São Nicolau ; celle-ci reprend pour l'essentiel, après actualisation, des travaux déjà publiés par l'auteur (Olivry, 1981) ; elle décrit les éléments caractéristiques du régime des précipitations mais s'attache aussi, à l'aide d'outils statistiques, à déterminer divers paramètres dont la prédétermination permet de dégager les éléments et les limites d'une bonne gestion des ressources en eau, et de mieux comprendre les mécanismes hydrologiques.

On verra malheureusement que la ressource initiale des précipitations est moins riche que celle annoncée par les estimations d'études plus anciennes qui, sans promettre de généreux apports, étaient encore trop optimistes.

### 1.1 LE RESEAU PLUVIOMETRIQUE

Avant la période actuelle, le réseau pluviométrique de l'île de São Nicolau a compté jusqu'à 14 stations. Depuis les campagnes ORSTOM, le réseau a d'abord été étoffé sur les bassins étudiés puis remis en service sur l'ensemble de l'île. Au cours des décennies 60-70, sept à huit postes seulement ont fonctionné.

Le tableau 3.1. indique les différents postes pluviométriques avec leurs coordonnées et leur altitude, leur numéro utilisé dans les tableaux et figures et le code informatique des stations installées avant le 31 décembre 1972. Les anomalies dans la

répartition spatiale des différents postes tiennent pour l'essentiel aux problèmes d'accès de certaines parties de l'île (souvent désertes, tant sur le plan humain que climatique).

N° Poste	Code Informat	Nom du Poste	Latitude	Longitude	Altitude
P8		Agua das Patas	16°36'49N	24°19'54W	400 m
P7	814005	Alto Antonio Miguel -> Cabecalinho	16°35'35N	24°19'17W	630 m
P9	814010	Cachaço	16°37'20N	24°20'27W	724 m
P23	814015	Calejoao Camp-> Camp de Preguiça	16°35'15N	24°17'50W	174 m
P3	814020	Calejoao Posto	16°36'15N	24°18'50W	185 m
P17		Camaraes	16°39'30N	24°20'35W	250 m
P 29		Camp de Porto	16°36'30N	24°13'10W	155m
P11		Canto de Faja	16°37'55N	24°21'06W	550 m
P 25	814025	Carrical	16°33'04N	24°05'21W	10 m
P14		Cha de Barata	16°38'37N	24°19'33W	249m
P15	814029	Estancia Bras	16°39'52N	24°19'26W	25 m
P6		Fabateira	16°37'14N	24°19'33W	345m
P12		Faja de Cima	16°38'24N	24°20'18W	388 m
P26		Juncalíneo	16°36'49N	24°08'20W	(150 m)
P2		Ladeira Igreja	16°36'50N	24°18'00W	160 m
P10		Monte Gordo	16°37'02N	24°21'35W	
P13		Morre Homen	16°38'50N	24°20'10W	310 m
P 27	814035	Morro Alto	16°36'22N	24°11'21W	280 m
P28	814036	Morro Bras	16°37'44N	24°11'59W	50 m
P21	814030	Ortelaô	16°36'33N	24°21'27W	712 m
P4		Pombas	16°36'42N	24°18'57W	210 m
P19	814040	Praia Branca	16°38'22N	24°23'27W	182 m
P24	814045	Preguiça	16°32'33N	24°17'06W	50 m
P16		Queimada	16°38'03N	24°19'20W	190 m
P20	814047	Ribeira Dos Calhaos	16°37'37N	24°21'57W	950 m
P18		Ribeira Prata	16°39'23N	24°22'00W	(50 m)
P5		Talho	16°36'54N	24°19'09W	200 m
P22	814050	Tarrafal	16°33'55N	24°21'44W	20 m
P1	814055	Vila San Joao	16°36'44N	24°18'10W	125 m

Tableau 3.1. : Liste des postes pluviométriques de l'île de Sao Nicolau classés par ordre alphabétique (numérotation et coordonnées)

## 2. HAUTEURS DE PRECIPITATIONS ANNUELLES

### 2.1 LES DONNEES BRUTES

#### 2.1.1 Examen des données

Les observations recueillies par J.CALLEDE portant sur 14 postes de l'île de São Nicolau, constituent un échantillon très hétérogène et le plus souvent discontinu :

- un seul poste a été observé plus de trente années,
- cinq postes ont été suivis pendant plus de vingt ans,
- neuf postes ont été suivis pendant plus de dix ans.

Les observations ont été souvent interrompues pendant de longues années et six stations ont été abandonnées à partir de 1950.

Seule la station de VILA de RIBEIRA BRAVA a été observée sans discontinuité de 1944 à 1984, soit pendant 40 ans.

A noter également que des relevés mensuels de 1914 et 1915 nous sont parvenus :

Les relevés sont généralement de bonne qualité et les années incomplètes relativement

peu nombreuses (37 années incomplètes sur 224 stations-années, soit 16,5 %) ; encore faut-il souligner que 28 années incomplètes, soit 12,5 % de l'échantillon, concernent les années 1974, 1975, 1976 et 1977 pour tous les postes en service dans l'île.

Le cas de ces quatre années mérite d'être développé. En 1974, les relevés manquants se rapportent aux mois de juillet et novembre ; en 1975, manquent octobre, novembre, décembre ; en 1976, juin, juillet et octobre ne figurent pas dans les relevés ; en 1977, seul le mois d'août a été retrouvé en archives. Ceci s'observe pour tous les postes alors en service. Il s'agit bien évidemment d'un problème d'archivage des données. Les données manquantes ont été regroupées pour l'île et ont pu être égarées ou négligées par le responsable local. Une autre hypothèse supposerait implicitement que les relevés négligés ne concernaient que des mois sans précipitations, ce qui n'est pas totalement exclu compte tenu de la période de fort déficit pluviométrique.

Pour les années incomplètes (9), les relevés manquants se rapportent le plus souvent à des mois généralement sans précipitations, sauf pour RIBEIRA dos CALHAUS (août 1950), HORTELAO (septembre 1950) et surtout CABECALINHO en 1964 où seul janvier a été relevé.

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
VILA	1914	12,8						20,7	96,8	152,0	25,0	56,5	28,5	399,3
	1915		11,5	13,0				57,0	33,3	66,7			8,3	189,8
CACHACO	1915							148,2	82,8	83,4			16,6	321,0

Tableau 3.2. Relevés anciens de Vila et Cachaco

Enfin pour les années 1978 à 1983 (campagnes ORSTOM), seuls les résultats s'intégrant au réseau de São Nicolau ont été considérés ici.

Ajoutons pour ces dernières années que les relevés météorologiques des mois de décembre et janvier ne nous ont pas toujours été communiqués. Quelques petites averses d'hiver peuvent donc manquer ; elles n'affectent guère le total annuel, ayant été perçues sur cette période comme insignifiantes par les habitants de l'île. En outre les pluies, lorsqu'elles surviennent, n'appartiennent pas au système pluviogénique intertropical.

Les tableaux 3.3 et 3.4 indiquent les hauteurs annuelles de précipitations observées aux différents postes de São Nicolau. Les relevés d'années incomplètes ont été mis entre crochets.

Au bas du tableau, on a mentionné le nombre d'années d'observations, la moyenne brute annuelle correspondant à la période d'observations de chaque poste ainsi que l'écart-type correspondant. Soulignons que ces valeurs n'ont, dans l'ensemble, pas grande signification du fait de l'hétérogénéité des périodes d'observations.

Une étude des précipitations à São Nicolau doit chercher à homogénéiser les séries de données. Cela est heureusement possible grâce à l'outil statistique et à la série continue d'observations recueillies à VILA de RIBEIRA BRAVA.

## 2.1.2 Contrôle de l'homogénéité des séries par la méthode de comparaison des totaux cumulés annuels

La station de VILA a été choisie comme poste de référence.

La méthode a consisté ici dans une comparaison entre les totaux pluviométriques annuels cumulés de VILA et ceux des autres stations, année par année sur la période commune d'observation.

Cette méthode est appelée improprement "méthode des doubles masses". Elle permet la détection d'hétérogénéités ou d'anomalies et éventuellement de corriger des erreurs systématiques (éprouvette ne correspondant pas au pluviomètre, changement d'implantation du pluviomètre avec effet d'abri, mauvaise qualité des observations, etc.).

Les totaux cumulés des précipitations annuelles de la station à contrôler sont portés en ordonnées ; ceux de VILA sont portés en abscisses. Lorsque les séries sont homogènes, on obtient une droite de régression unique dont la pente est une moyenne des pentes des tronçons successifs de la courbe. Une hétérogénéité est mise en évidence par une cassure nette dans le tracé de l'ajustement de la droite aux points expérimentaux, avec changement de pente de la droite (portion de droite pour une anomalie momentanée, nouvelle demi-droite quand le changement des conditions de mesure des précipitations paraît se poursuivre jusqu'à l'époque actuelle).

Année	Vila de R. Brava	Preguiça	R. de Calhaos	Tarrafal	Morro Alto	Morro Braz	Praia Branca
1930							
1931							
1940							
1941		115.4					413.0
1942		87.0					361.5
1943		207.5					533.0
1944	[162.6]	95.4					267.0
1945	214.5	70.6	730.5	14.9		188.0	275.5
1946	138.3	28.0	491.5	46.3		57.0	226.5
1947	96.9	45.2	258.3	72.0		65.7	60.8
1948	121.5	24.6	284.2	6.0		89.0	104.1
1949	238.9	126.8	257.0	105.7		193.3	278.0
1950	726.3	179.2	[826.9]	[210.8]		361.8	712.3
1951	248.2	86.6					
1952	753.8	150.5					
1953	454.6	148.0					
1954	246.4	167.7					
1955	297.3	190.3					
1956	683.7	234.1					
1957	411.6	177.7					
1958	477.7	173.2					
1959	86.4	13.7					
1960	243.9	59.3					
1961	410.2				327.5		531.3
1962	202.9				156.9		125.3
1963	202.8				177.6		149.8
1964	261.5				121.4		189.0
1965	176.0				0.0		158.0
1966	165.0				181.5		225.0
1967	217.5						254.0
1968	75.0				28.0		103.0
1969	149.0				209.0		349.0
1970	108.1				134.0		234.0
1971	76.2				153.0		112.5
1972	2.0				0.0		0.0
1973	107.0				91.5		95.5
1974	[12]				[101.0]		130.5
1975	[338.4]				[181.0]		242.0
1976	[20.2]	[3.0]			[40.0]		62.9
1977	[61.2]	[30.0]			[54.0]		110.6
1978	144.9						
1979	126.2				113.8		122.9
1980	163.1	58.7			216.0	58.8	77.8
1981	197.3	34.0			85.5	97.0	155.8
1982	41.9	2.6		5.4	25.5	17.5	120.0
1983	13.6	5.6		5.8	44.5	40.0	27.5
Année	40	26	6	8	21	10	32
Moy. Brute	221.9	96.6	474.7	58.4	116.3	116.8	212.8
Ecart type	186.3	71.8	253.1	71.7	83.2	104.0	159.9

Tableau 3.3 : Hauteurs de précipitations annuelles observées dans l'île de Sao Nicolau

Année	Hortelao	Estancia Bras	Cariçal	Calejao Posto	Calejao Campo	Cachaço	Cabecalinho
1930							
1931							
-----							
1940							
1941							
1942							
1943							
1944							
1945	278.9	258.0	46.9			788.5	
1946	191.1	86.0	1.2			253.1	
1947	184.0	165.5	4.3			394.2	
1948	96.0	228.5	23.2			306.0	
1949	258.6	275.0	207.5			317.5	
1950	246.4	713.0	7.3			999.1	
1951							
1952							
1953							
1954							
1955							
1956							
1957							
1958				320.1	213.3		
1959				80.5	37.0		
1960				203.4	154.2		
1961			125.7	327.7	255.5	631.1	
1962			62.5	186.2	124.9	599.6	435.2
1963			42.7	237.2	174.2	589.8	350.0
1964			84.0	263.4	221.9	167.4	20.0
1965			58.2	229.4		155.1	315.0
1966				160.2		327.0	314.0
1967				171.7		542.0	285.0
1968				40.1		74.0	65.0
1969				129.4	76.7	274.0	163.6
1970				131.0	108.7	221.0	160.0
1971				85.1	73.5	222.0	154.0
1972				8.4	4.9	19.1	10.0
1973				77.1	55.9	174.8	113.0
1974				3.8	8.2	96.9	30.5
1975				260.3	263.0	395.5	162.6
1976				14.0	18.5	94.1	39.6
1977					31.5	129.1	31.6
1978		92.3		169.3		348.5	
1979		124.7		142.3		291.0	229.9
1980		109.1		126.5	105.0	428.3	281.9
1981		206.9		151.3	173.2	325.8	220.9
1982		53.1		37.5	29.7	167.1	33.8
1983		125.5		11.4	10.4	54.1	28.3
Année	6	12	11	25	20	31	21
Moy. Brute	210.0	203.1	60.3	142.7	107.0	328.6	164.0
Ecart type	68.6	175.7	61.5	96.4	86.1	226.1	129.0

Tableau 3.4. : Hauteurs de précipitations annuelles observées dans l'île de Sao Nicolau

Les implantations actuelles étant bien connues, des vérifications étant faites sur le matériel de mesure, il est alors possible de décider de la période pour laquelle on aurait eu une erreur systématique et de corriger les observations en cause à partir du rapport des pentes. Si les conditions de mesure sont actuellement satisfaisantes, la correction doit s'appliquer sur la période ancienne.

Cette méthode a donc été appliquée aux différentes stations de São Nicolau.

La figure 3.1 présente une réduction des droites de comparaison ainsi établies. En abscisse nous avons fait figurer les années en regard des hauteurs pluviométriques cumulées de VILA.

En dehors de fluctuations locales ou accidentelles on ne relève pas, à l'examen de ces droites, de "cassures" déterminantes.

Il est donc permis de penser qu'on se trouve en présence de séries homogènes et la poursuite de l'étude sera en conséquence basée sur l'exploitation des données brutes existantes.

## **2.2 ESSAI DE RECONSTITUTION DE SERIES CHRONOLOGIQUES HOMOGENES DES HAUTEURS DE PRECIPITATIONS ANNUELLES**

L'extension des chroniques existantes, devant aboutir à des séries homogènes de même taille que l'échantillon de hauteurs

annuelles de précipitations à VILA de RIBEIRA BRAVA, suppose qu'il existe une liaison entre les précipitations reçues à VILA et celles qui ont été observées dans le temps aux autres stations de l'île.

Une telle liaison, supposée simple, se traduit par l'ajustement linéaire d'une fonction affine ( $y = ax + b$ ) obtenue par la prise en compte des différents couples de valeurs  $x, y$  de la période commune d'observations aux postes considérés.

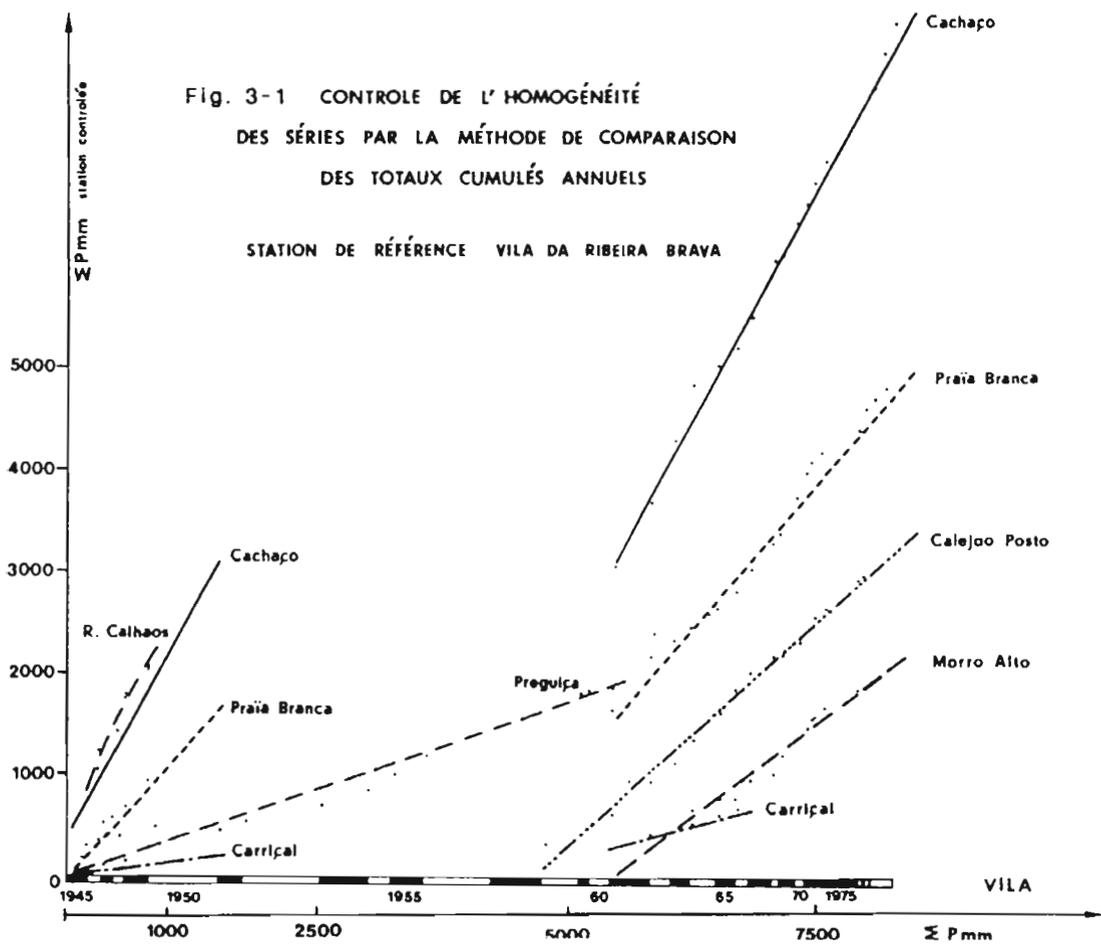
La détermination des paramètres de la droite d'estimation ou droite de régression est complétée par celle du coefficient de corrélation  $r$  qui précise le degré ou l'intensité de la liaison entre les deux variables.

Une valeur significative du coefficient de corrélation permet alors d'envisager l'extension de l'échantillon court (à  $p$  couples variables  $x-y$ ) et d'obtenir pour la station  $y$  la reconstitution d'un échantillon de taille  $n$  ( $n$  variables  $x$ ).

### **2.2.1 Corrélations sur les données brutes de données.**

Les calculs ont abouti aux résultats suivants dans lesquels sont mentionnés l'équation de la droite de régression, le coefficient de détermination  $r^2$  et le coefficient de corrélation linéaire  $r$ .

- Régression VILA (A.) - PREGUICA (B) sur  $p = 19$  ans.



$$PB = 0,26PA + 28,7$$

$$\text{avec } r^2 = 0,661 \text{ et } r = 0,813$$

66 % de la variance est expliquée par la corrélation.

La liaison n'est pas très bonne. Le coefficient de corrélation vrai a 95 % de chances d'être compris entre 0,57 et 0,92.

- Régression VILA (A.) - MORO ALTO (E) sur p = 16 ans.

$$PE = 0,54 PA + 41,7$$

$$\text{avec } r^2 = 0,528 \text{ et } r = 0,727$$

47 % de la variance n'est pas expliquée par la corrélation.

La vraie valeur de r a 95 % de chance d'être comprise entre 0,34 et 0,9.

- Régression VILA (A.) - PRAIA BRANCA (G) sur p = 24 ans.

$$PG = 0,90 PA + 47,3$$

$$\text{avec } r^2 = 0,785 \text{ et } r = 0,886.$$

- Régression VILA (A.) CALEJAO POSTO (K) sur p = 21 ans.

$$PK = 0,74 pa + 27,7$$

$$\text{avec } r^2 = 0,883 \text{ et } r = 0,94$$

Moins de 12 % de la variance est non expliquée par la corrélation.

r a 95 % de chances d'avoir sa valeur vraie comprise entre 0,86 et 0,975.

- Régression VILA (A.) -CACHACO (M) sur p = 25 ans.

$$PM = 0,59 PA + 209$$

$$\text{avec } r^2 = 0,314 \text{ et } r = 0,561$$

Seulement 31 % de la variance est expliquée par la corrélation.

La liaison est très mauvaise.

- Régression VILA (A.) - CABECALINHO (N) sur p = 14 ans

On a supprimé les années 1964 et 1975 incomplètes.

$$PN = 1,74 PA - 19,2$$

$$r^2 = 0,855 \text{ et } r = 0,977.$$

La vraie valeur de r a 95 % de chances d'être comprise entre 0,78 et 0,977. La liaison est bonne.

## 2.2.2 Corrélation entre VILA et les autres stations pour les années à relevés complets.

La même opération a été répétée en ne considérant que les années sans lacunes d'observations.

VILA (A.) - PREGUICA (B) (17 ans)

$$PB = 0,24 PA + 34,3$$

$$r^2 = 0,602 \text{ et } r = 0,776$$

VIALA (A.) - MORRO ALTO (E) (12 ans)

$$PE = 0,64 PA + 28,1$$

$$r^2 = 0,516 \text{ et } r = 0,719$$

VILA (A.) - PRAIA BRANCA (G) (20 ans)

$$PG = 0,97 PA + 31$$

$$r^2 = 0,816 \text{ et } r = 0,903$$

VILA (A.) - CARRICAL (J) (10 ans)

$$PJ = 0,46 PA - 30,2$$

$$r^2 = 0,438 \quad r = 0,662$$

VILA (A.) - CALEJAO POSTO (K) (18 ans)

$$PK = 0,71 PA + 37,7$$

$$r^2 = 0,855 \quad r = 0,925$$

VILA (A.) - CALEJAO CAMPO (L) (12 ans)

$$PL = 0,51 PA + 25,3$$

$$r^2 = 0,811 \quad r = 0,900$$

VILA (A.) - CACHACO (M) (18 ans)

$$PM = 1,28 PA + 124$$

$$r^2 = 0,604 \quad r = 0,777$$

VILA (A.) - CABECALINHO (N) (11 ans)

$$PN = 1,79 PA - 25,5$$

$$r^2 = 0,817 \quad r = 0,904$$

VILA (A.) - RIBEIRA dos CALHAOS (C) (6 ans)

$$PC = 0,77 PA + 277$$

$$r^2 = 0,523 \quad r = 0,723$$

VILA (A.) - TARRAFAL (D) (6 ans)

$$PD = 0,28 PA$$

$$r^2 = 0,778 \quad r = 0,882$$

VILA (A.) - MORRO BRAS (F) (6 ans)

$$PF = 0,46 PA + 40,6$$

$$r^2 = 0,895 \quad r = 0,946$$

VILA (A.) - HORTELAO (H) (5 ans)

$$PH = 0,98 PA = 44,1$$

$$r^2 = 0,666 \quad r = 0,816$$

§ - ESTANCIA BRAZ (I) (7 ans)

$$PI = 0,90 PA + 57$$

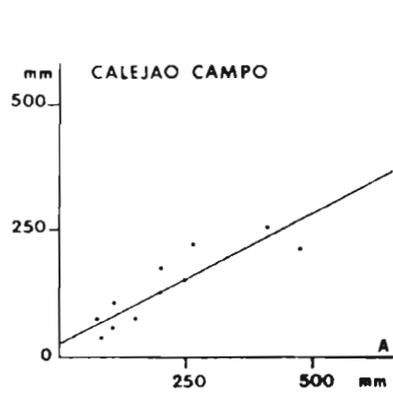
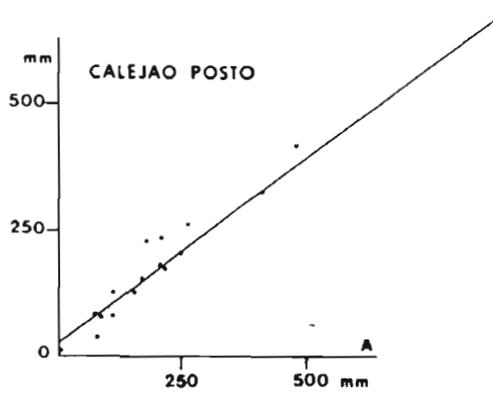
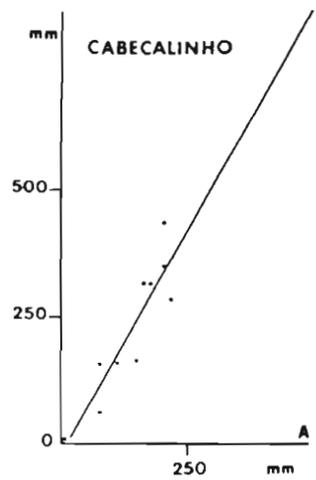
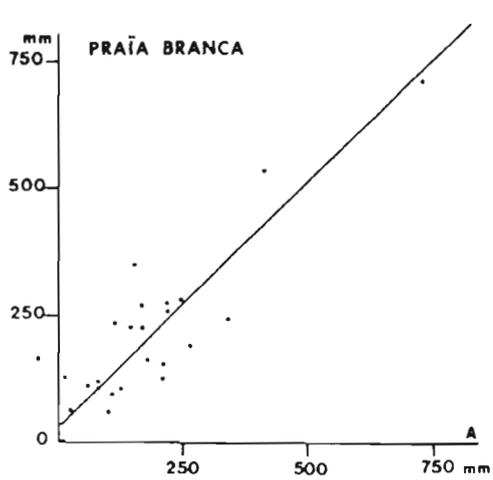
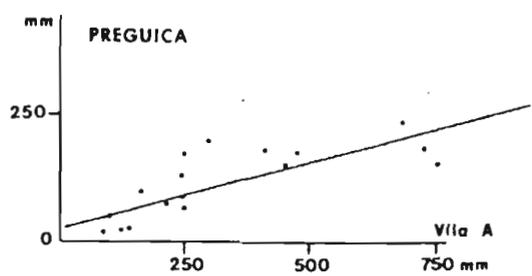
$$r^2 = 0,944 \quad r = 0,972$$

La prise en compte de séries plus courtes où n'apparaissent plus les années à relevés incomplets n'apporte pas d'amélioration dans la qualité de la régression ; la liaison est le plus souvent moins bonne que pour la série complète. Une exception, cependant, pour PRAIA BRANCA où  $r$  passe de 0,886 à 0,903, mais le gain est peu significatif.

Pour les séries très courtes de 5, 6 et 7 ans dont les calculs de corrélation ont été donnés ci-dessus en fin d'énumération, il faut être très réservé quant à la confiance que l'on peut accorder aux régressions trouvées même pour MORRO BRAZ où le coefficient de corrélation est bon et ESTANCIA BRAZ où il est très bon.

Les graphiques de la figure 3.2 illustrent les principales corrélations étudiées ici et permettent d'en nuancer la portée.

Si les droites de régression obtenues pour PREGUICA, PRAIA BRANCA, CALEJAO POSTO et CALEJAO CAMPO paraissent significatives, il n'en est pas de même pour la station de CABECALINHO. En effet, les plus fortes précipitations annuelles pour VILA de l'échantillon commun sont de l'ordre de 200 mm ; l'échantillon complet de VILA comprend des valeurs de plus de 700 mm. La reconstitution des valeurs manquantes de



**Fig. 3-2 EXEMPLES DE CORRÉLATIONS ENTRE PRÉCIPITATIONS ANNUELLES DE DIFFÉRENTS POSTES ET DE VILA (A)**

CABECALINHO nécessite une très grande extrapolation de la courbe de régression dont la linéarité conduirait à des valeurs maximales improbables de l'ordre de 1 300 mm.

Par ailleurs, le poids des données reconstituées ne doit pas être excessif par rapport à celui des données véritablement observées. Ceci nous a amené à renoncer à une extension des données d'ESTANCIA BRAZ.

En conclusion, la reconstitution de données manquantes a été faite à partir de VILA pour les stations de :

- PREGUICA (la régression n'a pas été utilisée pour les plus faibles valeurs de VILA),
- PRAIA BRANCA,
- CALEJAO POSTO,
- CALEJAO CAMPO.

Les observations de 1941, 1942 et 1943 à PRAIA BRANCA ont été utilisées pour reconstituer ces trois valeurs à VILA et porter la série complète des 5 stations à 40 valeurs annuelles des hauteurs de précipitations (1941-1980). Ces valeurs seront utilisées plus loin dans l'étude fréquentielle. Elles sont indiquées dans le tableau 3.5.

### **2.3 COMPARAISON DES MOYENNES PARTIELLES AUX DIVERSES STATIONS**

L'étude de corrélation n'a donc abouti qu'à une extension des données limitée à

quelques stations mal réparties dans l'île de São Nicolau. Une approche de la distribution spatiale des précipitations annuelles suppose que l'on puisse estimer des valeurs moyennes homogènes sur l'ensemble des stations de l'île. En comparant les moyennes partielles des différents postes sur différentes périodes, nous avons cherché empiriquement :

- à vérifier que le rapport des moyennes partielles d'une même station pour deux périodes déterminées est voisin des rapports obtenus dans les mêmes conditions pour d'autres stations, et en particulier VILA. Ceci constitue le 1er indice d'une évolution dans le temps de la pluviosité, comparable à celle de VILA sur l'ensemble de l'île ;
- à vérifier que les rapports des moyennes partielles d'une station sur les moyennes partielles de la station de VILA sont voisins pour différentes périodes, ce qui recouvre l'étude des régressions qui a été faite et, en particulier voisins du rapport obtenu pour l'ensemble de la période commune à la station et à VILA.

Si cela est vrai pour un certain nombre de stations, il y a une forte probabilité pour que cela soit vrai aussi pour des stations n'offrant qu'une seule période d'observation souvent très courte. Il sera alors possible d'en déduire une estimation de la moyenne pluviométrique annuelle à partir de la moyenne globale de VILA (obtenue sur 40 ans).

Année	A Vila R.B.	B Preguiça	G Praia Branca	K Calejao Posto	L Calejao Campo
1940					
1941	(391.8)	115.4	413.0	(316.8)	226.7
1942	(339)	87.0	361.5	(277.9)	199.5
1943	(514.9)	207.4	533.0	(407.7)	290
1944	162.2	95.4	267.0	(147.7)	108.9
1945	214.5	70.6	275.5	(186)	135.6
1946	138.3	28.0	226.5	(129.8)	96.4
1947	96.9	45.2	60.8	(99.2)	75.2
1948	121.5	24.6	104.1	(117.4)	87.8
1949	238.9	126.8	278.6	(204)	148.2
1950	726.3	179.2	712.3	(563.7)	398.7
1951	248.2	86.6	(272.9)	(210.9)	152.9
1952	753.8	150.5	(765.6)	(584)	412.9
1953	454.6	148.0	(474.0)	(363.2)	259
1954	246.4	167.7	(271.1)	(209.5)	152
1955	297.3	190.3	(320.7)	(247.1)	178.2
1956	683.7	234.1	(397.3)	(532.3)	376.8
1957	411.6	177.7	(432.1)	(331.5)	236.9
1958	477.7	173.2	(496.5)	320.1	213.3
1959	86.4	13.7	(115.2)	80.5	37.0
1960	243.9	59.3	(268.7)	203.4	154.2
1961	410.2	(134.0)	531.3	327.7	255.5
1962	202.9	(80.8)	125.3	186.2	124.9
1963	202.8	(80.8)	149.8	237.2	174.2
1964	261.5	(95.8)	189.0	263.4	221.9
1965	176.0	(73.9)	158.0	229.4	115.8
1966	165.0	(71.0)	225.0	160.2	110.2
1967	217.5	(84.5)	254.0	171.7	137.2
1968	75.0	(48.0)	103.0	40.1	63.9
1969	149.0	(66.9)	349.0	129.4	76.7
1970	108.1	(56.5)	234.0	131.0	108.7
1971	76.2	(48.3)	112.5	85.1	73.5
1972	2.0	(0)	0	8.4	4.9
1973	107.0	(56.2)	95.5	77.1	55.9
1974	12	(0)	130.5	3.8	8.2
1975	338.4	115.5	242.0	260.3	263.0
1976	20.2	3.0	62.9	14.0	18.5
1977	61.2	30.0	110.6	(72.9)	31.5
1978	144.9	(65.0)	(177.9)	169.3	99.8
1979	126.2	(60.0)	122.9	142.3	90.2
1980	163.1	58.7	77.8	126.5	105.0
m	246.7	90.3	270.0	209.2	153.0
s	190.1	60.3	187.6	142.4	101.6

Tableau 3.5. : Hauteurs de précipitations annuelles observées dans l'île de Sao Nicolau

Les calculs montrent :

- 1° que le rapport des moyennes calculées sur les périodes 1945-1950 et 1962-1977 varie de 1,74 à 2, avec 1,88 pour VILA, (4 stations). Sur les périodes 1945-1950 et 1961-1965, il varie de 1 à 1,2 pour 4 stations dont CACHACO et CARRICAL ;
- 2° que les rapports entre les précipitations moyennes calculées pour différentes périodes et celles correspondantes de VILA varient : - de 0,31 à 0,35 pour PREGUICA, de 0,8 à 0,63 et 0,83 pour MORRO ALTO , - de 1,08, 1,17, 0,92, et 1,17 pour PRAIA BRANCA, de 0,35 à 0,30 et 0,32 pour CARRICAL, - de 0,85 et 0,9 pour CALEJAO POSTO, - DE 1,99, 1,88, 1,71, à 2,04 pour CACHACO, DE 1,41 à 1,83 et 1,57 pour CABECALINHO. (Les différents rapports sont indiqués dans l'ordre chronologique, la dernière valeur correspondant à l'ensemble de la période commune avec VILA). On voit que ces valeurs sont dans l'ensemble assez voisines pour une même station.

Ceci indique que la liaison "station-VILA" ne varie pas dans le temps de manière significative et confirme la linéarité des régressions étudiées précédemment. Il convient de souligner que cette approche par les moyennes partielles n'apporte pas un complément d'information à l'étude de corrélation, mais

seulement une simplification empirique, moins rigoureuse, basée sur le choix du coefficient  $k$  de fonction linéaire  $y = kx...$  et on retrouve ici la pente des droites de comparaison de la méthode des doubles masses vue en 2.1.2. L'estimation de la moyenne interannuelle (40 ans) pour les stations observées sur la seule période 1945-1950 à partir du rapport correspondant avec VILA-RIBEIRA de CALHAOS : 1,85, TARRAFAL : 0,30, MORRO BRAZ : 0,62, HORTELAO : 1,1 - moyenne pondérée de 1,26 et 0,82 - ESTANCIA BRAZ : 1,12, aboutit à des résultats cohérents.

#### 2.4 ESTIMATION DE LA HAUTEUR INTERANNUELLE DES PRECIPITATIONS RECUES AUX DIFFERENTES STATIONS DE SAO NICOLAU (40 ANS)

Afin de comparer les résultats de différentes démarches effectuées, nous avons indiqué dans le tableau 3.6 ci-après les valeurs de la hauteur interannuelle de précipitations obtenues :

- par l'équation de la droite de régression,
- par la moyenne des éventuels échantillons reconstitués,
- par application des coefficients  $k$  indiqués à la moyenne de VILA.

On notera la faible divergence des résultats.

Station	$P = aP_{Vila} + b$	$1/40 P_i$	K	$P = kP_{Vila}$	P moyenne valeur arrondie retenue
A Vila de Ribeira Brava	246.7	246.7	1.00	246.7	250
B Preguiça	92.6	90.3	0.35	87.1	90
C Ribeira dos Calhaos	469.3	.	1.85	456.4	460
D Tarrafal	74.0	.	0.30	.	75
E Morro Alto	175.0	.	0.80	197.4	200
F Morro Braz	155.8	.	0.62	153.0	155
G Praia Branca	273.6	270.0	1.10	271.4	275
H Hortelao	(289.2)	.	1.11	274	275
I Estancia Braz	281.2	.	1.12	276.3	280
J Carrical	85.5	.	0.32	78.0	80
K Calejao Posto	211.3	209.2	0.90	223.0	225
L Calejao Campo	153.2	153.0	0.66	163.0	165
M Cachaço	442.0	.	2.00	493.0	500
N Cabecalinho	413.0	.	1.60	396.0	400

Tableau 3.6. : Estimation de la hauteur interannuelle de précipitation d'après les relations établies avec la station de Vila.

La dernière colonne indique la valeur arrondie de la moyenne interannuelle retenue.

## 2.5 REPARTITION SPATIALE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES MOYENNES

### 2.5.1 Carte des isohyètes interannuelles

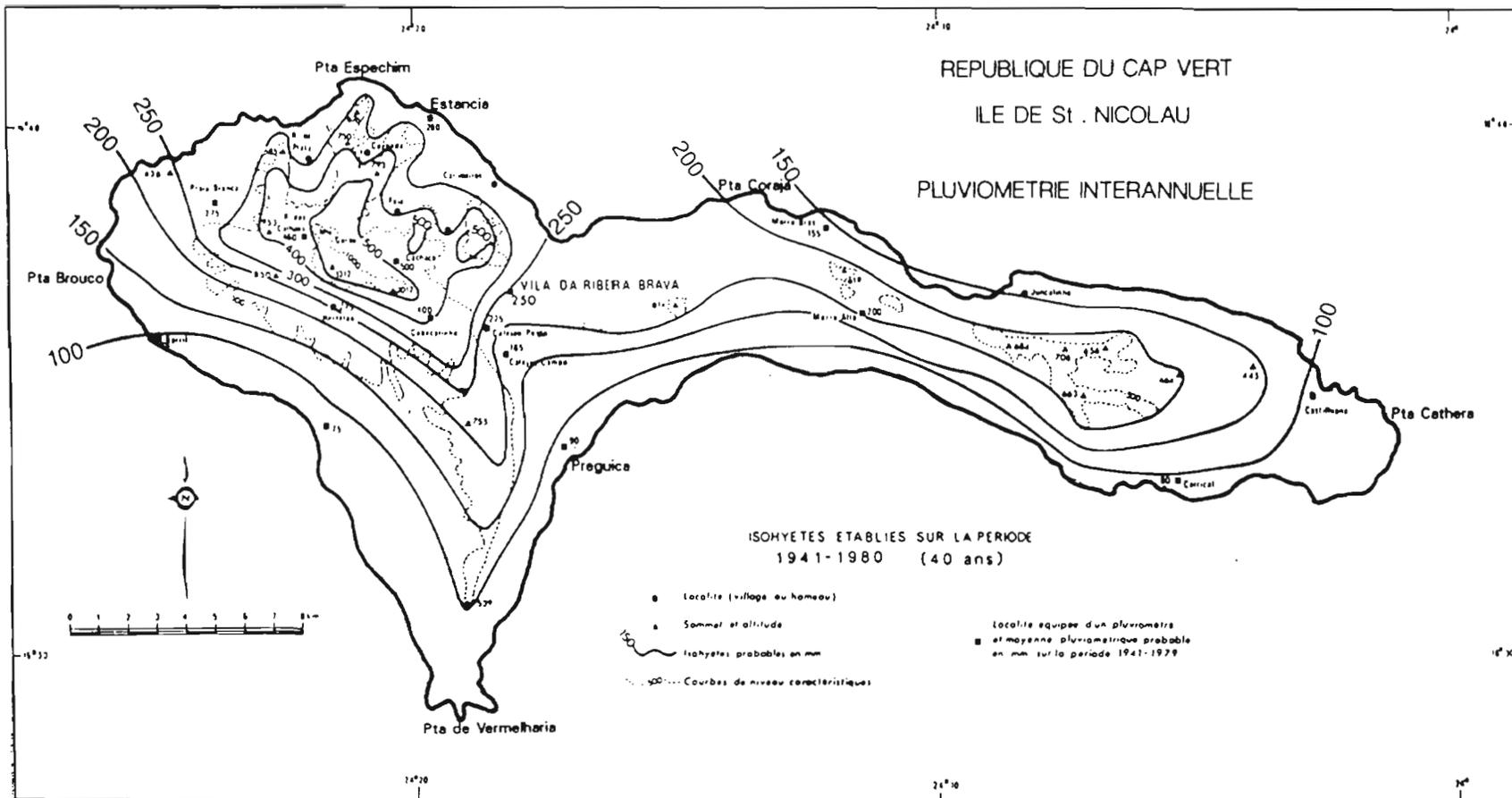
A partir des valeurs retenues pour hauteurs moyennes des précipitations annuelles des 14 stations de l'île de São Nicolau, une esquisse du dessin des courbes isohyètes (ligne d'égale hauteur de pluie) a été faite.

Elle est présentée dans la carte (Fig 3.3). Cette carte appelle quelques commentaires : L'hétérogénéité spatiale de la répartition des pluies à São Nicolau constitue un fait, d'évidence tant pour les habitants de l'île que

pour le voyageur frappé par les paysages contrastés.

La partie la plus arrosée de l'île est localisée sur la région nord du Monte GORDO (1 312 m) et de ses articulations comprises entre PRAIA BRANCA et VILA de RIBEIRA BRAVA. C'est la région de l'île dont le relief est le plus marqué et l'altitude la plus élevée. Les précipitations augmentent avec l'altitude. Ceci a permis d'appuyer le dessin des isohyètes sur celui du relief.

Au-dessus de l'isohyète 500 mm, l'information manque, mais il est probable que les hauteurs du Monte GORDO reçoivent en moyenne plus de 600 mm par an. Les parties méridionales de l'île ne reçoivent qu'une pluviométrie très faible, tant sur la façade Sud-Ouest (BARRIL, TARRAFAL) que sur les bordures littorales Sud (PREGUICA, CARRICAL) de la partie orientale de l'île.



De BARRIL à CASTILHANO, la hauteur de précipitation interannuelle est inférieure à 100 mm.

La partie orientale de l'île (à l'est d'une ligne VILA-PREGUICA) est peu arrosée, non seulement sur ses côtes sud, comme cela vient d'être dit, mais aussi sur la côte nord. De MORRO BRAZ à VILA, il y a un gain en précipitation, difficile à préciser dans les régions intermédiaires (Mt BISSAU : 614 m) faute d'information ; le dessin des isohyètes reste en conséquence très imprécis et peut être un peu optimiste en affectant à ces régions une pluviométrie supérieure à 200mm.

Les reliefs de la partie orientale de l'île sont modestes et "accrochent" mal les perturbations. La station de MORRO ALTO indique toutefois des précipitations plus abondantes que sur le littoral nord et il est probable que la hauteur de précipitation interannuelle est supérieure à 200 mm sur l'ensemble de ces reliefs. Dans le massif de la grande CALDEIRA (706 m) entre JUNCALINHO et CARRICAL, les précipitations interannuelles pourraient même atteindre 250 mm.

Enfin, les versants sud du Monte GORDO bénéficient, en altitude, des précipitations relativement abondantes issues des perturbations du nord ayant débordé la ligne de crêtes. L'isohyète 300 mm se situerait grosso modo à l'altitude 800 m ; à l'altitude 600 m il y aurait déjà moins de 200 mm de précipitations interannuelles.

La dorsale montagneuse du CHAO BENITO qui sépare TARRAFAL de PREGUICA et se termine plein sud à la PUNTA de VERMELHARIA est par contre très peu arrosée.

Une telle esquisse ne peut évidemment prétendre reproduire l'exacte répartition des précipitations interannuelles sur l'île de São Nicolau ; elle en donne cependant une image assez précise dans l'état actuel des observations pour permettre une estimation des apports en eau météorique en année moyenne sur les différentes régions de l'île.

## 2.5.2 Volume des apports des précipitations en année moyenne

La détermination de la hauteur de précipitation annuelle moyenne reçue par l'île de São Nicolau a été obtenue par planimétrage des aires comprises entre les différentes courbes isohyètes.

L'île (343 km<sup>2</sup>) reçoit en moyenne 205 mm par an, soit un volume de 70 millions de m<sup>3</sup>.

Un quart de l'île reçoit moins de 110 mm (en moyenne 90 mm) ; un autre quart reçoit plus de 250 mm (en moyenne 340 mm).

## 2.5.3 La "normale" des précipitations annuelles

Il s'agit d'une moyenne interannuelle définie par l'Organisation Météorologique Mondiale. Elle est calculée pour 30 années d'observations sur une période commune à toutes les stations météorologiques de la

communauté internationale aux fins de comparaison d'un pays à l'autre. Cette "normale" précédemment fixée à la période 1931-1960 vient d'être actualisée. La référence est aujourd'hui la période 1951-1980 ; elle intègre donc les années déficitaires de la dernière décennie.

Les valeurs de la Normale sont données ci-après à titre indicatif pour quelques stations de l'île. VILA : 230,8, PREGUICA : 87,7, PRAIA BRANCA : 252,2, CALEJAO : 197,3, CALEJAO CAMPO : 143,7

## 2.6. ETUDE FREQUENTIELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES

### 2.6.1 Généralités

Une telle étude consiste à estimer la période de retour ou la fréquence d'apparition de telles ou telles hauteurs de précipitation annuelle pour chaque station à partir de l'échantillon d'observation par l'ajustement d'une loi statistique de distribution.

L'échantillon dont on dispose est jugé d'autant plus représentatif d'un échantillon de taille infinie qu'il comprend un plus grand nombre d'années d'observations. Une telle statistique n'est pas envisageable pour les stations de moins de dix années d'observations telles TARRAFAL, CARRICAL, ESTANCIA BRAZ, HORTELAO...

Les hauteurs annuelles de précipitation ont été classées et leurs fréquences expéri-

mentales calculées suivant l'expression  $F = (r-1/2) / N$  où  $r$  est le rang de la valeur dans le classement et  $N$  le nombre total de valeurs de l'échantillon.

Un premier examen des valeurs des précipitations annuelles sur São Nicolau montre une irrégularité interannuelle telle (très forts coefficients de variation) qu'il convenait d'envisager différents types de lois de distribution et tenir compte de l'éventualité de précipitations annuelles nulles.

L'utilisation du calcul automatique a permis de considérer et comparer les ajustements à neuf lois de distribution par la méthode du maximum de vraisemblance, les paramètres d'échelle étant positifs a priori. Les distributions retenues étaient :

- Loi de LAPLACE-GAUSS ou loi normale
- Loi de GUMBEL ou doublement exponentielle
- Loi de GALTON ou Gausso-Logarithmique
- Loi de PEARSON III ou Gamma incomplète en  $x$
- Loi de PEARSON V ou Gamma incomplète en  $1/x$
- Loi de GOODRICH ou exponentielle généralisée
- Loi de FRECHET
- Loi WRC-USA ou Log Gamma de 1ère espèce
- Loi des FUITES.

Comparer ces diverses distributions consiste à rechercher la meilleure adéquation soit graphiquement par le tracé des différentes courbes en diagramme Gausso-arithmétique, avec report des valeurs expérimentales, soit par le calcul de tests (test du Ki2) indiquant la probabilité d'adéquation de la loi.

A l'exclusion de la loi de GAUSS, normale, représentée graphiquement par une droite (droite de Henry), le calcul des paramètres des autres lois conduit à des distributions hypernormales dont les courbes ont leur concavité tournée vers l'axe des précipitations (figures 3.4 à 3.7).

## 2.6.2 Les résultats

Les calculs ont été effectués sur l'échantillon des stations suivantes :

- VILA de RIBEIRA BRAVA,
- PRAIA BRANCA,
- PREGUIÇA,
- CALEJAO POSTO,

- CALEJAO CAMPO,
- CACHACO,
- MORRO ALTO.

Pour les cinq premières stations, on a considéré l'échantillon reconstitué de 40 années (2.2) après avoir vérifié qu'il n'y avait pas trop de distorsion avec les échantillons naturels de taille plus réduite (1).

Les résultats des ajustements aux neuf distributions envisagées montrent qu'un certain nombre de lois doivent être rejetées d'emblée pour conduire à des valeurs extrêmes aberrantes. Pour les autres, le test d'adéquation permet d'établir une hiérarchie.

Dans le tableau 3.7 ci-après, nous indiquons les trois "meilleures" lois pour chaque échantillon avec leur pourcentage de probabilité.

(1) : L'analyse fréquentielle faite sur les échantillons naturels de ces cinq stations aboutit à des hauteurs de précipitations plus faibles que dans l'analyse de l'échantillon de 40 ans pour des périodes de retour identiques. Cela tient au caractère déficitaire de la période d'observation.

Station	1	2	3
VILA (40 ans)	Fuites 64.4	Gumbel 53.7	Goodrich 47.00
Praia Branca (40 ans)	Gumbel 52.4	Fuites 48.6	Goodrich 7.00
Preguiça (40 ans)	Gumbel 70.7	Fuites 50.4	Gauss 12.9
Calejao Posto (40 ans)	Gumbel 93.1	Fuites 72.3	Goodrich 12.5
Calejao Campo (40 ans)	Gumbel 96.1	Fuites 95.4	Goodrich 67.4
Cachaço (20 ans)	Fuites 85.4	Pearson V 84.7	Galton 84.6 et Gumbel 82.6
Morro Alto (13 ans)	Gauss 51.4	Gumbel 29	Fuites 13.6

Tableau 3.7 : Test de différentes lois de distribution avec indication de leur pourcentage de probabilité

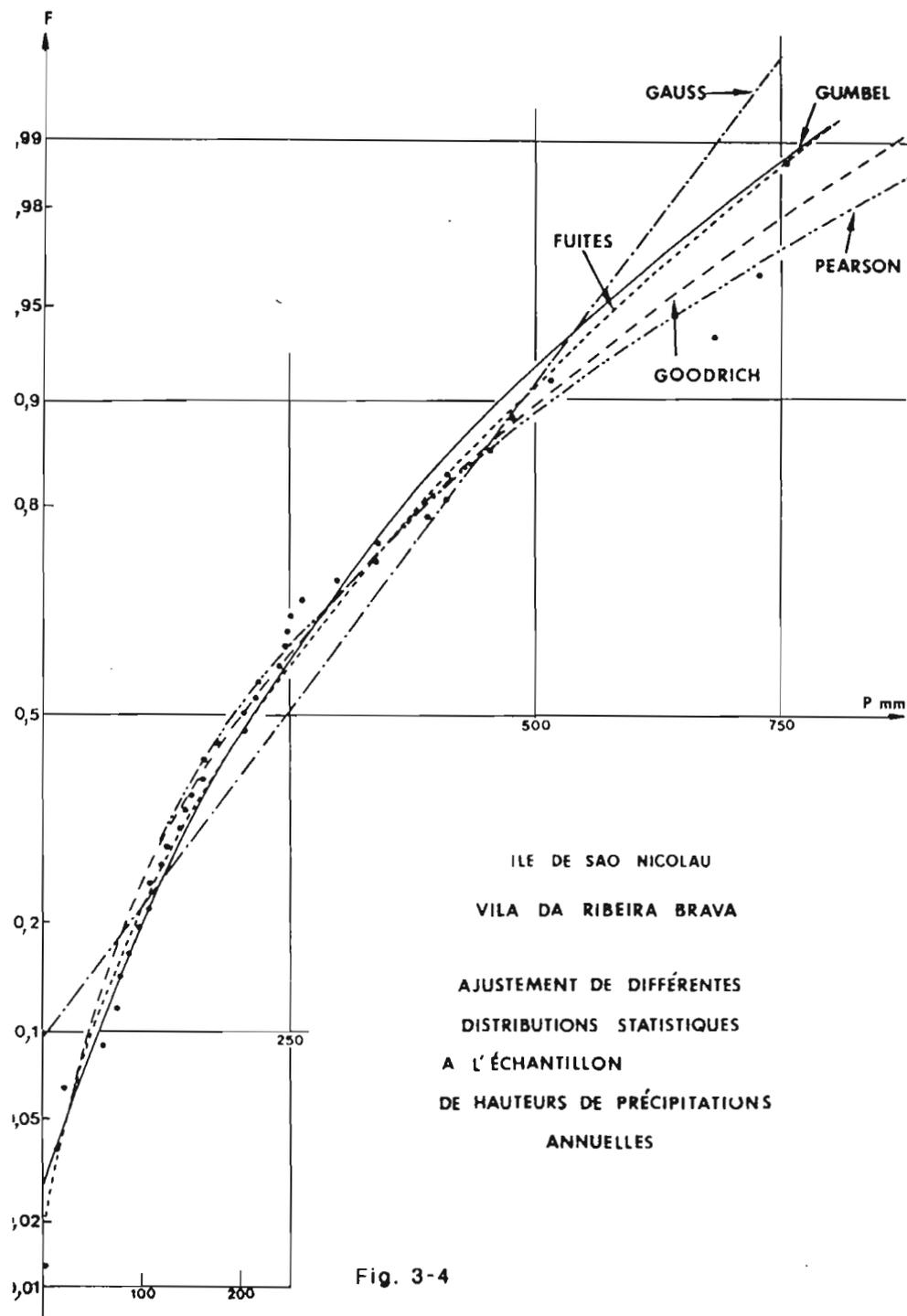


Fig. 3-4

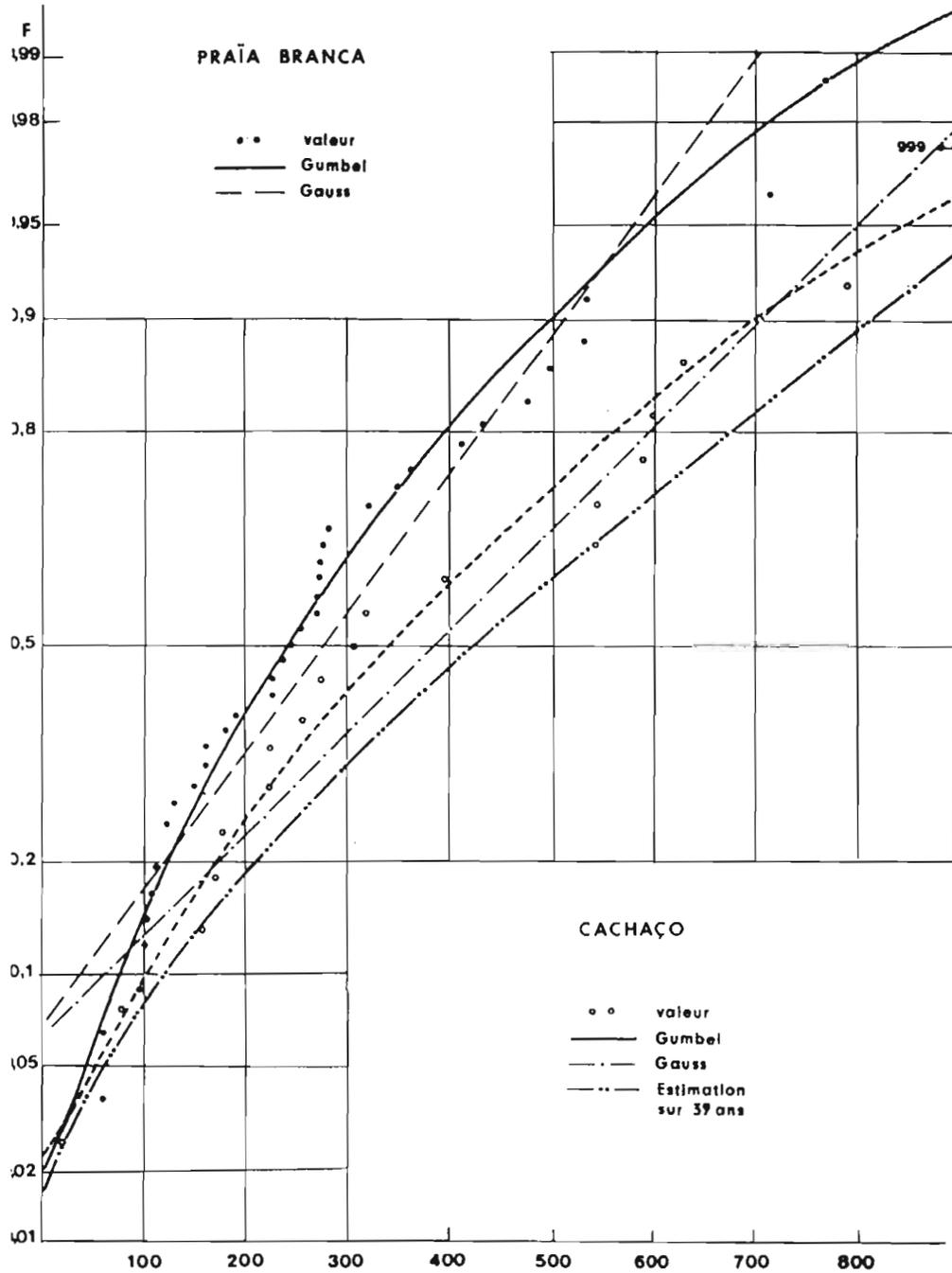


Fig. 3-5 ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES PRÉCIPITATIONS ANNUELLES A SAO NICOLAU

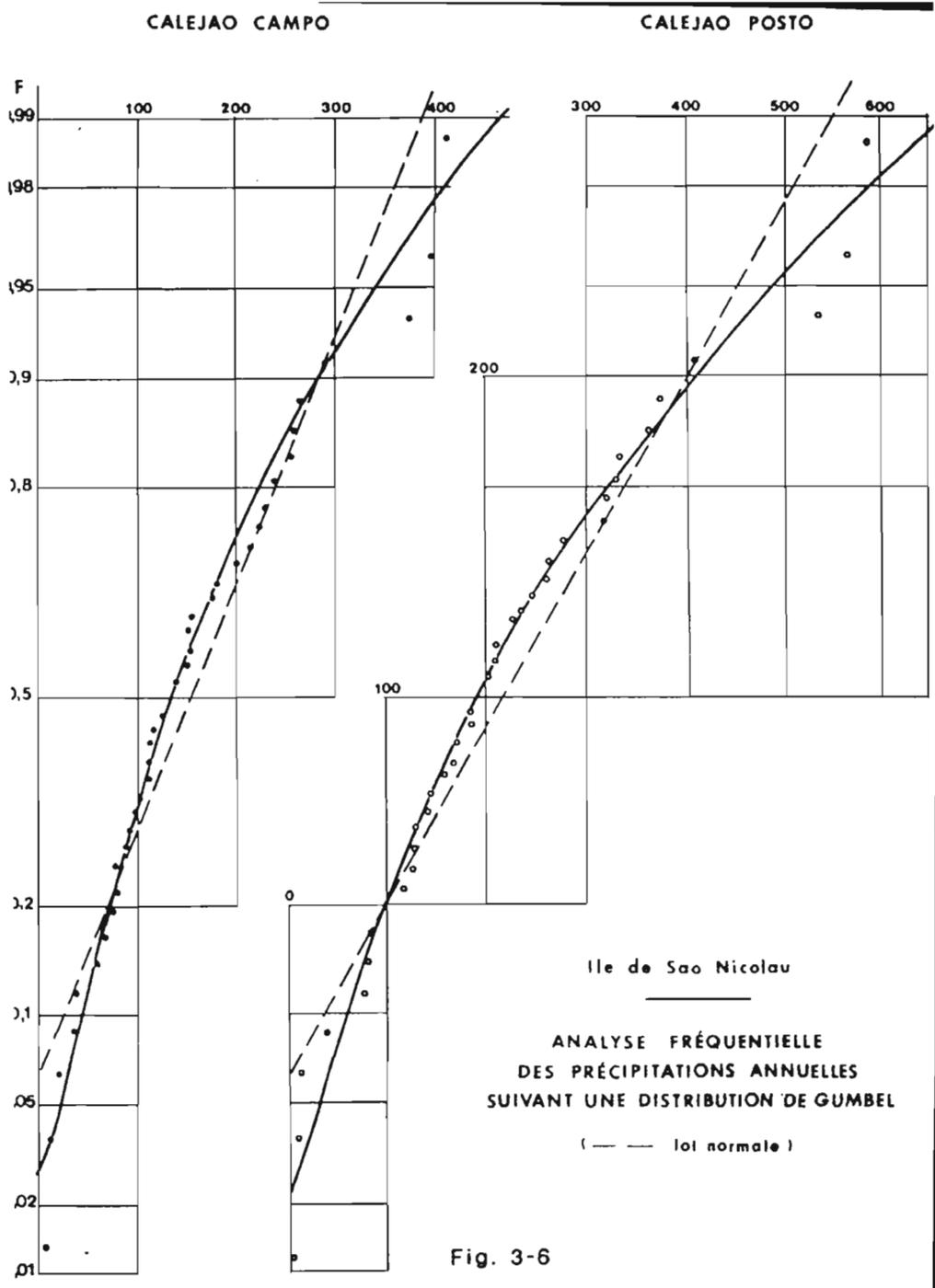
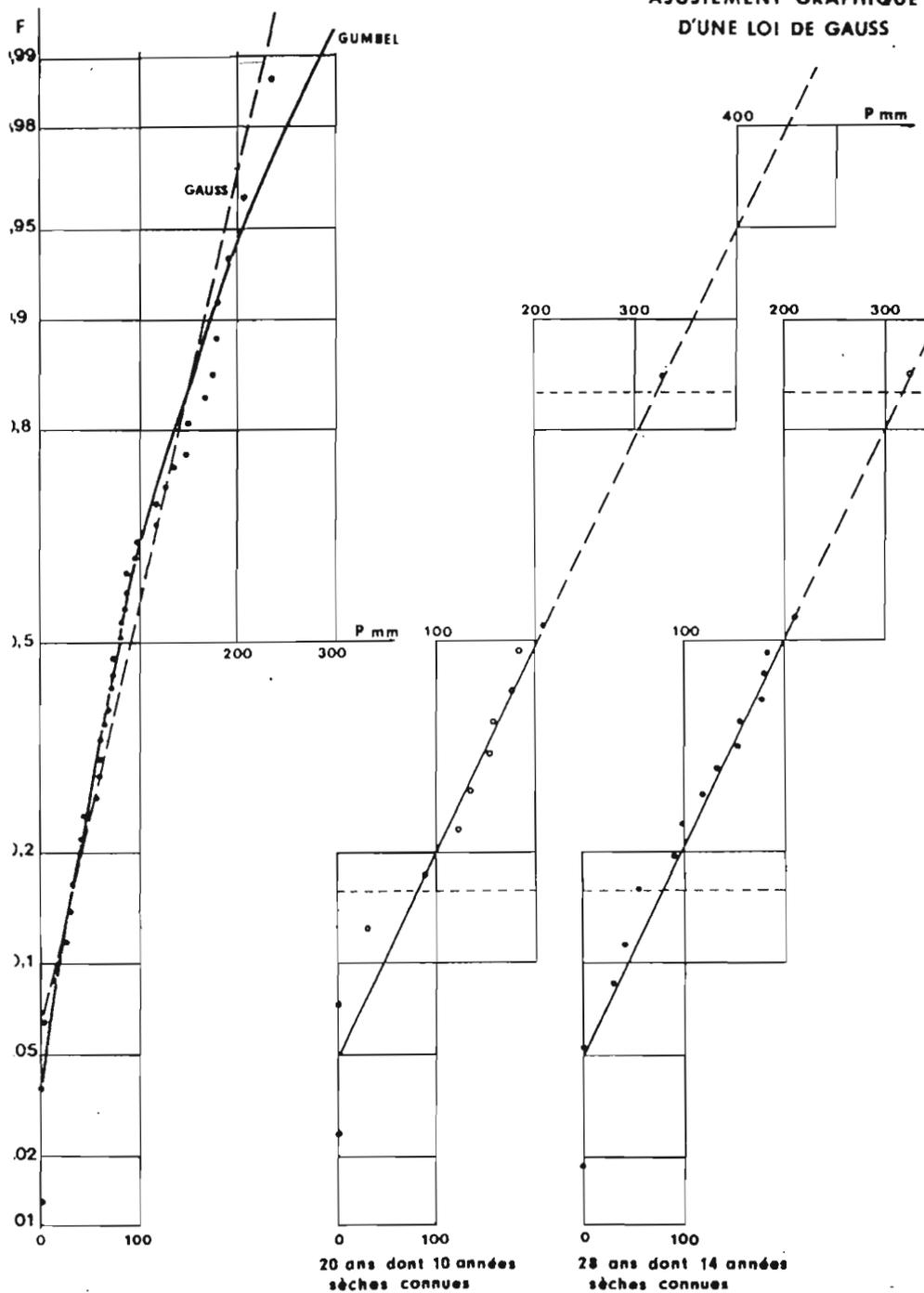


Fig. 3-6

PREGUICA

Fig. 3-7

MORRO ALTO  
AJUSTEMENT GRAPHIQUE  
D'UNE LOI DE GAUSS



Pour l'ensemble des stations, une distribution suivant la loi de GUMBEL ou la loi des FUITES paraît devoir être généralement admise. Une loi unique à été choisie pour l'île de São Nicolau, et les résultats qui sont donnés plus loin correspondent à la distribution de GUMBEL.

La fonction de répartition de la loi de GUMBEL, ou doublement exponentielle, s'écrit :

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-x_0}{s}}}$$

dans laquelle F(x) est la fréquence au non dépassement

- e exponentielle
- x variable

$x_0$  paramètre de position ou mode

s paramètre d'échelle.

Le tableau 3.8 ci-après avoir rappelé la précipitation interannuelle estimée au paragraphe 2.4 donne les caractéristiques de la distribution de GUMBEL :

- moyenne et en dessous coefficient de variation permettant de déterminer E.T (E.T = Cv.x),
- paramètre d'échelle s (s = 0,780 E.T),
- paramètre de position ou mode  $x_0$  ( $x_0 = x - 0,577 s$ ).

Les colonnes suivantes indiquent pour des fréquences ou périodes de retour choisies en années sèches et humides les hauteurs de précipitations annuelles correspondantes.

Station (N années)	P mm moyen	Loi de GUMBEL			Hauteurs de précipitations (mm) pour fréquences au non dépassement											
		Paramètres Echelle Position			Périodes de retour											
		Moyenne et Cv	s	$x_0$	Années sèches				Médiane			Années humides				
					100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	
VILA (40)	250	243,5 0,704	133,6	166,4	0	0	19,9	55	103	215	367	467	563	687	781	
PRAIA BRANCA (40)	275	271,5 0,640	135,4	193,4	0	8,7	44,8	80,4	129	243	396	498	596	722	816	
PREGUICA (40)	90	91,3 0,687	48,9	63,1	0	0	9,5	22,3	39,8	81	136	173	209	254	288	
CALEJAO POSTO (40)	225	219,2 0,658	112,4	154,3	0	1,0	31,0	60,6	101	195	322	407	488	593	671	
CALEJAO CAMPO (40)	165	152,3 0,663	78,8	106,9	0	0	20,4	41,2	69,4	136	225	284	341	414	469	
(CACHACO) (19) Estimation sur 39 ans	500	379,4 0,662	195,8	266,4	0	10	51,7	103	173	338	560	707	848	1030	1167	
(MORRO ALTO) (12)	200	Loi 200 0,60	de 120	Gauss 200	0	0	5	45	100	200	300	350	395	440	475	

Tableau 3.8 : Résultats de l'étude fréquentielle des précipitations annuelles sur 7 stations de l'île de São Nicolau

Remarque :

Pour CACHACO, les résultats indiqués doivent être pris avec réserve compte tenu de la moyenne des 19 années d'observations nettement inférieure à celle qui a été estimée par ailleurs.

La précipitation cinquantennale sèche n'est probablement pas nulle. L'hypernormalité de la loi ne permet pas de proposer une correction simple des valeurs indiquées.

On peut estimer qu'une correction de 25 % à 10 % en allant vers les valeurs extrêmes doit aboutir à des résultats assez proches de la réalité.

Pour MORRO ALTO dont l'échantillon de 12 années se situe essentiellement en période sèche, nous avons préféré renoncer à présenter un ajustement suivant GUMBEL, corrigé comme pour CACHACO.

Nous avons admis que la distribution suivait une loi normale et par suite que les valeurs inférieures à la moyenne estimée à 200 mm avaient des fréquences inférieures à 0,5. Sur l'échantillon de 12 ans, 10 valeurs sont inférieures à 200 mm et sont supposées représenter les valeurs "sèches" d'un échantillon de 20 ans. Ces valeurs sont affectés de leurs fréquences "sèches" et on a tracé par ajustement graphique la droite de Henry dont la prolongation donne les valeurs des précipitations pour des fréquences "humides" données. En répétant l'opération sur un

échantillon de 16 ans, incluant les années 1974 à 1977 pour lesquelles des réserves ont été faites en 2.1.1, on aboutit aux mêmes résultats. Pour terminer cette étude fréquentielle les esquisses cartographiques de la figure 3.8 présentent quelques résultats caractéristiques.

## 2.7 VARIATION DE LA PLUVIOMETRIE A SAO NICOLAU

La pluviosité d'une année est définie par le rapport de la hauteur de précipitations de cette année à la hauteur de précipitations interannuelle. Elle sera inférieure à 1 dans le cas de précipitations déficitaires et supérieure à 1 pour des précipitations annuelles excédentaires.

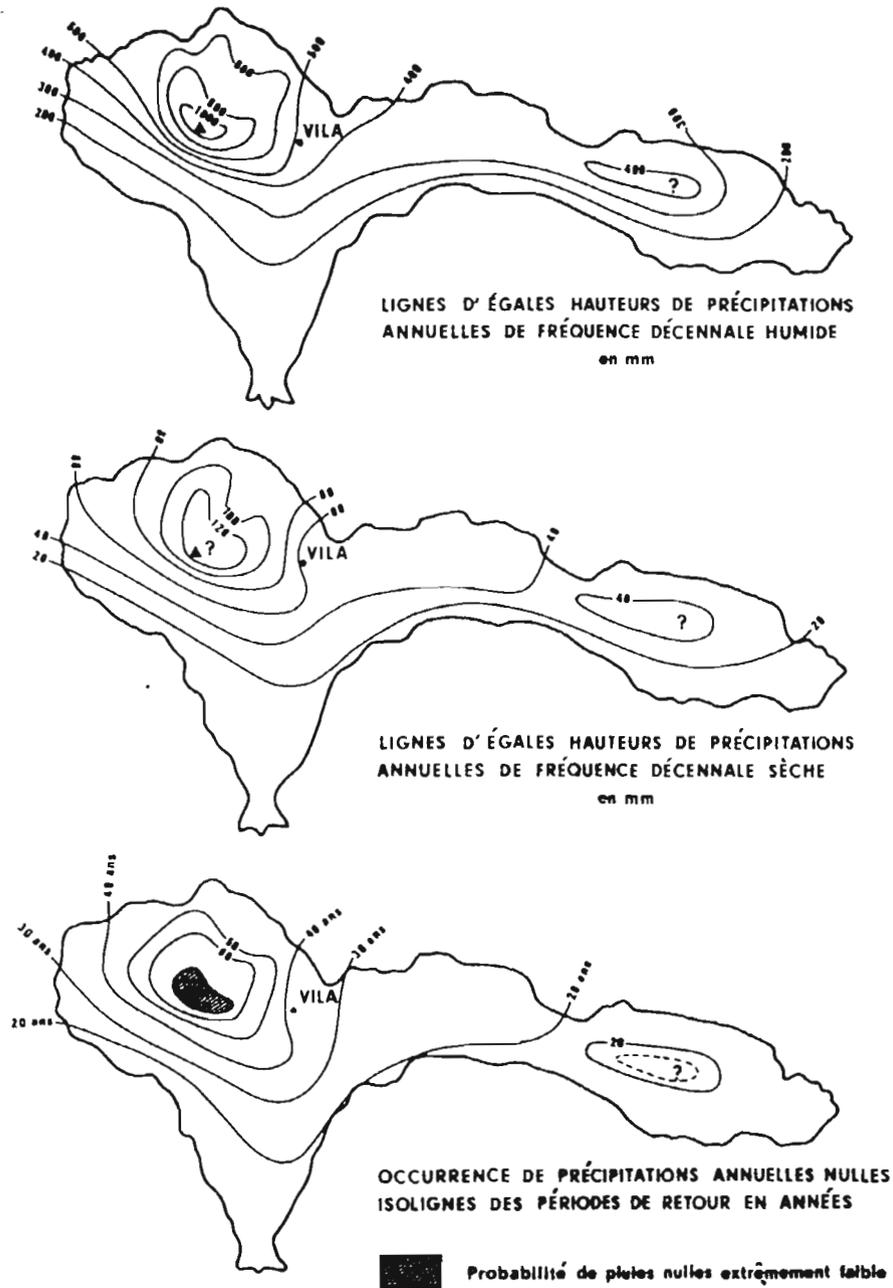
La hauteur de précipitations interannuelle étant un paramètre évolutif dans le temps, fonction des nouvelles observations, nous avons préféré nous limiter ici à l'indication des variations dans le temps de la pluviométrie annuelle.

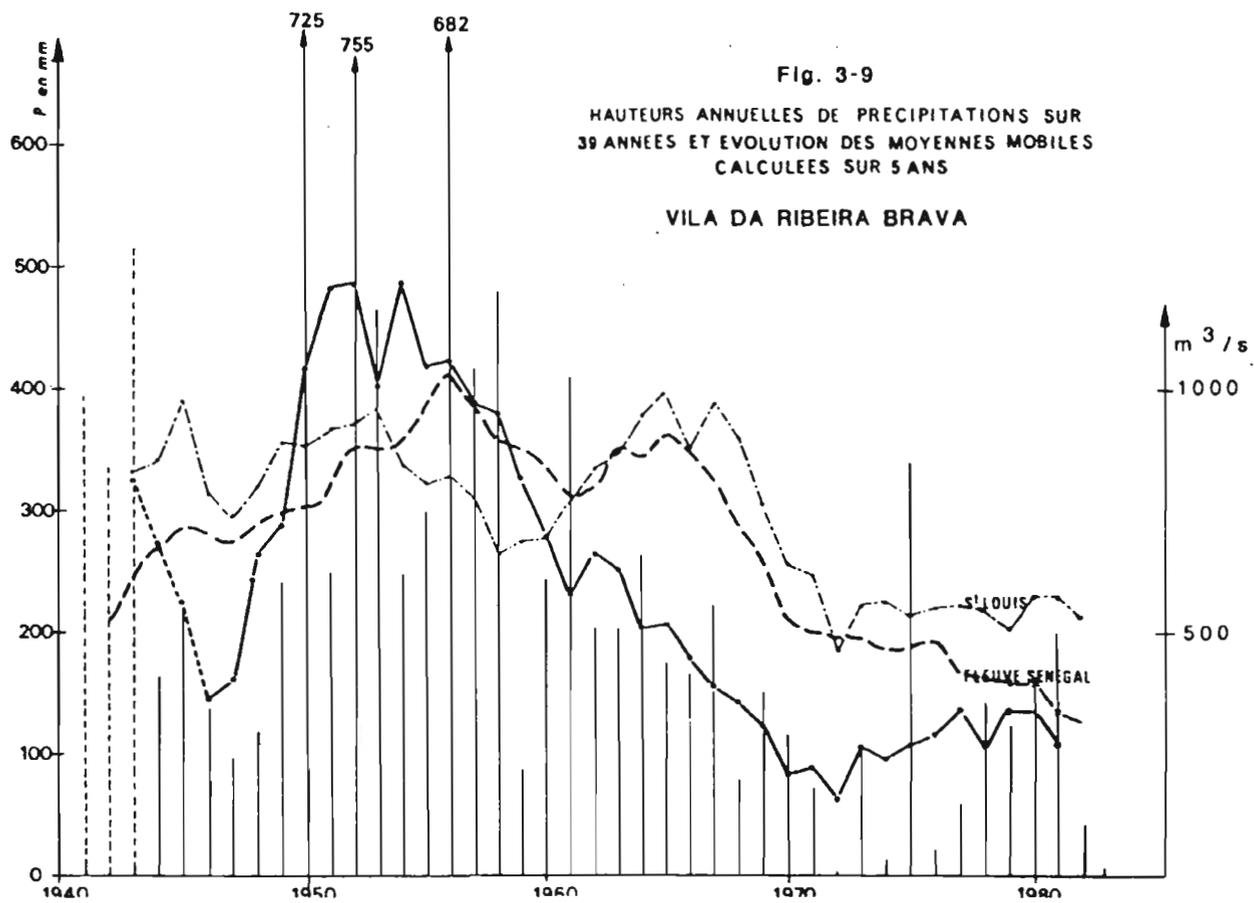
L'évolution de ces variations à été présentée pour VILA dans la figure 3.9.

Le calcul des moyennes mobiles sur 5 ans permet une meilleure vision de ces variations en "lissant" les fortes variations d'une année à l'autre.

On observe pour VILA à la suite d'une période déficitaire dans les années 40 une décennie de précipitations abondantes de 1950 à 1960.

Fig. 3-8 ESQUISSE CARTOGRAHIQUE DE QUELQUES RÉSULTATS DE  
L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES PRÉCIPITATIONS ANNUELLES  
A SAO NICOLAU





Depuis 1960, la pluviosité montre une nouvelle période déficitaire qui se prolonge jusqu'à nos jours et dont le minimum pourrait se situer en 1972. L'actuelle période de sécheresse qui a marqué les quinze dernières années tant au CAP-VERT que sur le continent africain est plus longue et plus marquée que les périodes de sécheresse antérieures connues en Afrique (autour de 1913, 1940).

Cette persistance de la période de précipitations déficitaires conduit d'ailleurs à réfuter dans l'état actuel des connaissances l'existence d'une périodicité déterminée des cycles secs et humides. Celle-ci a souvent été estimée à 30 ans par différents auteurs mais sur des périodes d'observations trop courtes et souvent trop localisées - quelques stations seulement étaient en service au début du siècle sur le continent africain - et sur des considérations historiques récentes trop qualitatives et souvent subjectives.

Ces remarques ne signifient évidemment pas qu'il n'y ait pas de variations cycliques mais "leur éventuelle périodicité reste encore à démontrer soit par un complément d'années d'observations (au moins 60 ans), soit qu'un modèle général de l'atmosphère permette un jour par simulation de reproduire de telles variations". (Roche, 1973)

Par ailleurs, il n'y a pas toujours synchronisme dans les cycles déficitaires d'une région à l'autre. Ainsi en comparant l'évolution des précipitations à SAINT-LOUIS du SENEGAL, situé à la même latitude que São Nicolau, on n'observe pas systématiquement de variations concomitantes avec l'évolution des précipitations à VILA de RIBEIRA BRAVA.

A la limite, le seul trait commun évident porterait sur les précipitations relevées depuis 1970 avec en particulier la coïncidence des minimums de 1972. L'évolution des moyennes mobiles (5 ans) des précipitations de SAINT-LOUIS montre bien une période humide au début des années 50 comme à São Nicolau, mais, alors qu'à VILA l'actuelle période déficitaire s'amorce dès 1959 - elle dure depuis 20 ans -, on observe à SAINT-LOUIS une période humide bien marquée au milieu des années 60. L'évolution de l'hydraulicité du fleuve Sénégal qui intègre les variations spatiales de la pluviosité de l'extrême Ouest Africain correspond à peu près à celle des précipitations de SAINT-LOUIS.

L'absence de corrélation entre les valeurs annuelles ou les moyennes mobiles de VILA et de SAINT-LOUIS ne permet donc pas de reconstituer l'évolution des précipitations de VILA avant 1940.

Elle ne signifie pas pour autant qu'il n'y ait pas, grosso modo, correspondance dans les périodes de sécheresse.

On pourrait supposer que l'apparition générale de mécanismes induisant des précipitations déficitaires a des conséquences plus marquées, peut-être plus longues et sans doute plus précoces ou plus immédiates dans

les îles du CAP-VERT que sur le continent africain (effet d'inertie du continent ?). Mais ceci nous ramène aux considérations plus générales sur les conditions climatiques de l'archipel du CAP-VERT et en particulier sur le problème des sécheresses répétées et des famines concomittantes, qui caractérisent l'histoire du CAP-VERT, et que nous avons évoqué en début d'ouvrage.

### 3. LA REPARTITION DES PLUIES DANS L'ANNEE

#### 3.1 HAUTEURS MENSUELLES DE PRECIPITATIONS

En abordant cette étude de la répartition des pluies dans l'année et en particulier des hauteurs mensuelles de précipitations, on se trouve confronté à un échantillon de données de base dont l'hétérogénéité ne tient plus seulement d'une station à l'autre aux différentes périodes d'observations, mais aussi pour une même station à des échantillons de relevés mensuels de taille différente (cas des années incomplètes).

Il ne serait d'ailleurs pas raisonnable d'espérer un gain d'information satisfaisant par une démarche longue et laborieuse d'extension des données mensuelles.

En se limitant à une étude de l'échantillon disponible de données brutes il va de soi que

le total annuel des hauteurs de pluies moyennes mensuelles pourra diverger sensiblement des moyennes annuelles estimées au chapitre précédent.

Afin de conserver une certaine homogénéité aux résultats présentés ici, les moyennes annuelles ont été affectées d'un coefficient  $k$  exprimé par le rapport pluviométrie annuelle/total des moyennes mensuelles de la période d'observation.

Notre souci consistant surtout à donner une image de la répartition mensuelle des précipitations sur l'île de São Nicolau, seules quelques stations représentatives ont été retenues.

Le tableau 3.9 donne les hauteurs moyennes mensuelles de précipitations corrigées par le coefficient  $k$  ainsi que le pourcentage de chaque mois par rapport au total annuel.

Stations		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Vila ( $k = 1$ )	mm %	1,6 0,6	5,3 2	0,3 0,1	0,0 0	0,2 0,1	0,1 0	9,2 3,7	55,7 22,3	95,1 38,1	41,4 16,6	30,0 12	11,3 4,5	250 100
Preguiça ( $k = 0,78$ )	mm %	3,0 3,1	3,5 3,9	0,1 0,1	1,3 1,4	0,0 0	0 0	1,1 1,2	21,8 24,3	30,5 34,0	14,3 16,0	7 7,8	7,4 8,2	90 100
Praia Branca ( $k = 1,13$ )	mm %	3,0 1	1,6 0,5	1,2 0,4	0 0	0 0	0 0	8,2 3,0	64,2 23,4	149,0 54,2	36,5 13,3	7,3 2,7	4,0 1,5	275 100
Morro Alto ( $k = 1,53$ )	mm %	1,8 0,9	1,3 0,6	0,2 0,1	0 0	0 0	0 0	12,8 6,4	63,1 31,6	97,3 48,6	11,8 5,9	11,2 5,6	0,5 0,3	200
Calejaõ Posto ( $k = 1,42$ )	mm %	2,3 1	4,0 1,8	0,4 0,2	0 0	0 0	0 0	12,3 5,5	61,9 27,5	97,7 43,4	23,7 10,5	17,6 7,8	5,1 2,3	225 100
Cachaço ( $k = 1,4$ )	mm %	9,8 1,9	4,7 0,9	1,0 0,2	0 0	0 0	0,4 0,1	31,4 6,3	135 27	221 44,2	64,3 12,9	24,1 4,8	8,5 1,7	500 100

Tableau 3.9 : Estimation des précipitations moyennes mensuelles sur 5 stations de São Nicolau

Un second tableau 3.10 indique pour les mêmes stations considérées les valeurs caractéristiques de totaux pluviométriques mensuels sur leurs périodes d'observation.

- le maximum observé ;
- le quartile supérieur, c'est à dire la valeur égale ou dépassée une fois sur quatre (dans 25 % des cas) ;
- la médiane observée, ou la valeur égale ou dépassée dans 50 % des cas ;
- le quartile inférieur, ou valeur égale ou dépassée dans 75 % des cas ;
- le minimum observé n'a pas été reporté car il est nul dans tous les cas sauf pour CACHACO où il est de 3,7 mm et 7,7 mm respectivement en août et septembre.

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
<b>Vila</b>													
Maximum	27,9	40,6	5	0,5	9,0	2,5	80,6	269,3	474,9	309,9	358	155	753,8
Quartile supérieur	1,0	1	0	0	0	0	9	84,1	144	43,1	29	7,6	353,7
Médiane observée	0	0	0	0	0	0	0	36,8	58	12,0	3,0	0	214,5
Quartile inférieur	0	0	0	0	0	0	0	15,2	13,5	0	0	0	114,8
<b>Preguiça</b>													
Maximum	43,6	30,5	2,5	38,1	2,5	0	14,7	123,1	138,3	119,3	87,4	55,3	234,1
Quartile supérieur	0	2,2	0	0	0	0	0	30,4	71,3	1,3	4,4	16,4	176,5
Médiane observée	0	0	0	0	0	0	0	22,9	24,2	0	0	0	121,1
Quartile inférieur	0	2	0	0	0	0	0	7,0	1,9	0	0	0	64,9
<b>Praia Branca</b>													
Maximum	60	18	21	0	0	0	124	172	403	235,8	79,6	41,0	712,3
Quartile supérieur	0	0	0	0	0	0	2	99	185	31,5	1,8	0	278,6
Médiane observée	0	0	0	0	0	0	0	48	98,3	4,0	0	0	225,7
Quartile inférieur	0	0	0	0	0	0	0	15,5	38,5	0	0	0	112,5
<b>Morro Alto</b>													
Maximum	18	13	0	0	0	0	68	120,2	188,5	60,6	60,0	0	327,5
Quartile supérieur	0	0	0	0	0	0	6,8	66,0	93,8	5,0	0	0	179,6
Médiane observée	0	0	0	0	0	0	0	37,5	58,0	0	0	0	143,5
Quartile inférieur	0	0	0	0	0	0	0	10,0	0	0	0	0	58,8
<b>Calejao Posto</b>													
Maximum	16,9	19,4	2,0	0,2	0	0,4	60,3	161,1	192,4	120,2	79,8	42,3	327,7
Quartile supérieur	0	0	0	0	0	0	8,7	73,5	125,3	25,5	13,8	0	233,3
Médiane observée	0	0	0	0	0	0	2,0	29,9	35,7	3,7	2,2	0	165,9
Quartile inférieur	0	0	0	0	0	0	0	14,5	10,6	0	0	0	82,8
<b>Cachaço</b>													
Maximum	70,0	23,0	8,8	0	0	6,2	194,0	303,7	675,0	192,0	177,5	76,2	999,1
Quartile supérieur	0	0	0	0	0	0	31,0	118,1	221,1	69,0	9,0	1,7	589,8
Médiane observée	0	0	0	0	0	0	2,0	69,0	95,9	25,0	0	0	306
Quartile inférieur	0	0	0	0	0	0	0	32,4	57,8	0	0	0	174,8

Tableau 3.10. Estimation des précipitations moyennes mensuelles : valeurs extrêmes, quartiles et médiane.

Les figures 3.10 et 3.11 donnent une représentation graphique de ces tableaux.

On observe que les mois susceptibles de

recevoir des précipitations sont compris entre juillet et mars. La probabilité de relever quelques traces de pluie de mars à juin est pratiquement nulle.

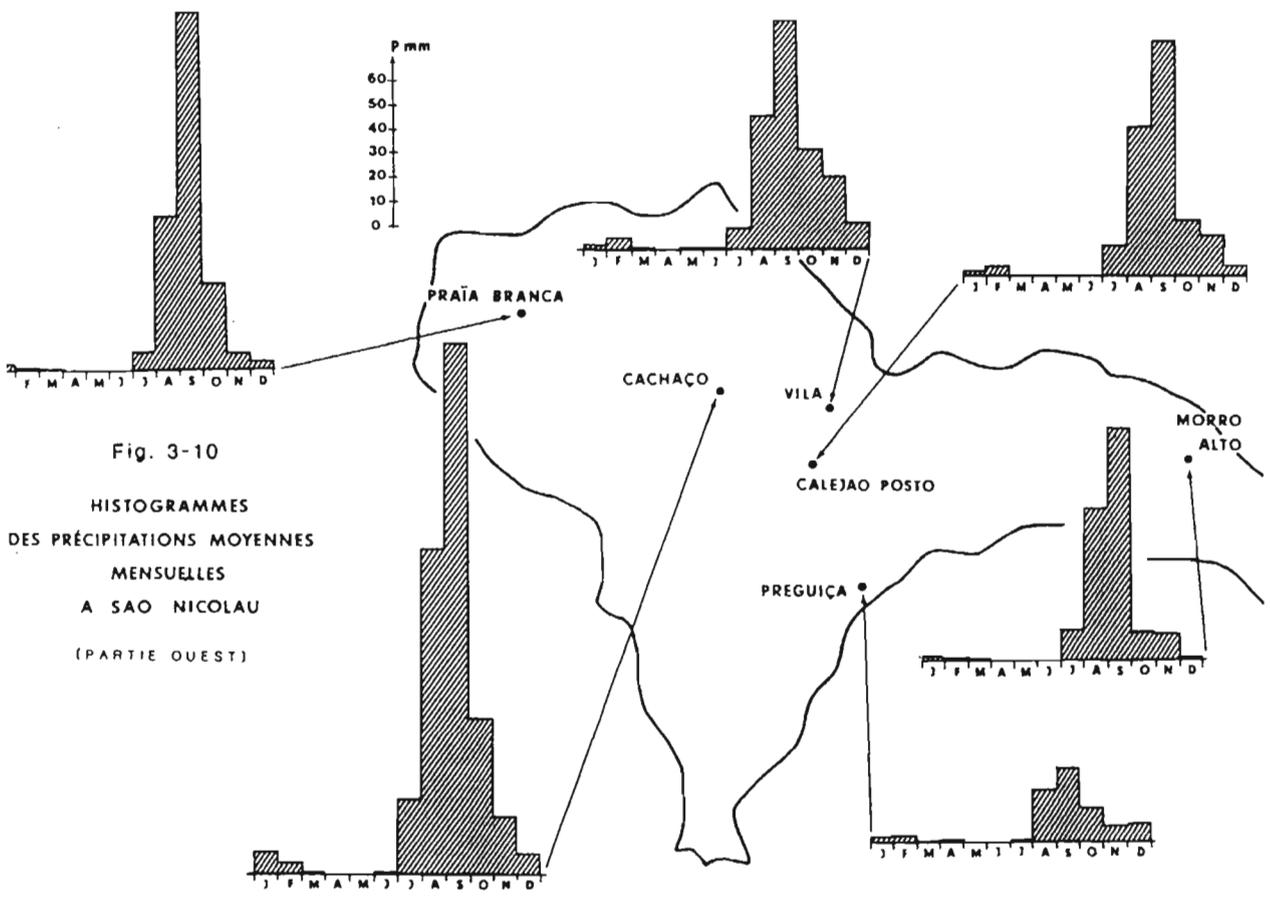


Fig. 3-10  
 HISTOGRAMMES  
 DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES  
 MENSUELLES  
 A SAO NICOLAU  
 (PARTIE OUEST)

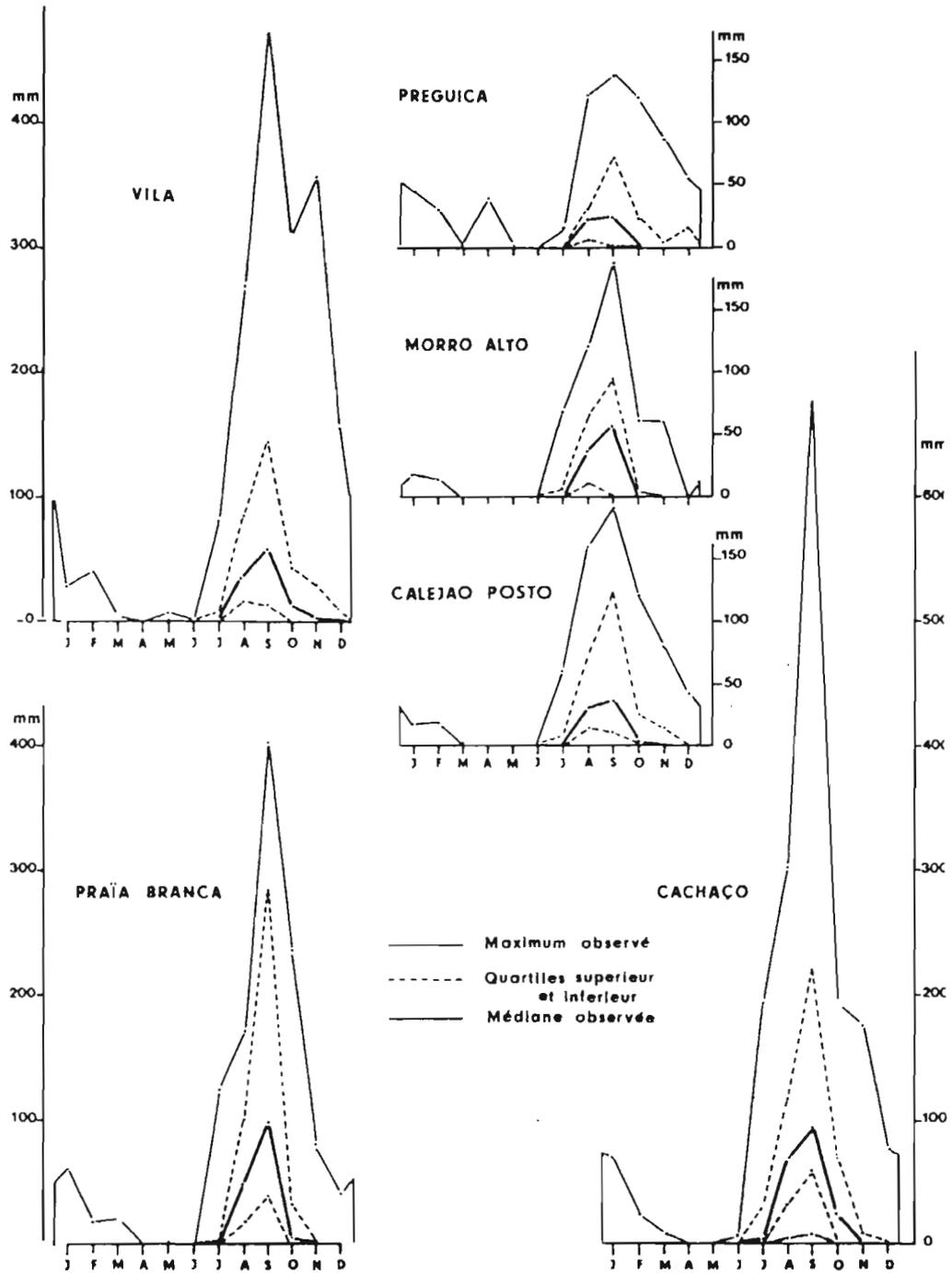


Fig. 3-11 VARIATIONS DE QUELQUES VALEURS CARACTÉRISTIQUES DES PRÉCIPITATIONS MENSUELLES A SAO NICOLAU

La saison des pluies proprement dite est observée de juillet à octobre avec surtout deux mois où les précipitations peuvent être abondantes en août et septembre. Septembre est en moyenne le mois des plus fortes précipitations. On recueille pendant ce mois 54 % des précipitations de l'année moyenne à PRAIA BRANCA, entre 40 et 50 % pour CACHACO, MORRO ALTO et CALEJAO POSTO ; le pourcentage n'est que de 34 % à PREGUICA et 38 % à VILA.

Les précipitations moyennes d'août et septembre représentent à elle seules de 60 à 80 % du total des précipitations interannuelles :

- 58,3 % à PREGUICA,
- 60,4 % à VILA,
- 70,9 % à CALEJAO POSTO,
- 71,2 % à CACHACO,
- 77,6 % à PRAIA BRANCA,
- 80,2 % à MORRO ALTO.

Les différences d'une station à l'autre peuvent tenir à l'imprécision des déterminations qui ont été faites. Il n'est cependant pas impossible d'y voir une incidence de l'orographie favorisant des précipitations relativement plus abondantes en août-septembre à CACHACO, PRAIA BRANCA et même MORO ALTO.

Les précipitations moyennes de juillet sont le plus souvent nettement inférieures à celles du mois d'octobre. São Nicolau passe sous l'influence de la masse d'air humide dans le courant du mois de juillet (remontée

septentrionale du Front Inter Tropical ; F.I.T.), mais cela n'implique pas pour autant l'observation immédiate en année normale de précipitations.

La moitié des observations de juillet (médiane) montre des précipitations nulles ou pratiquement nulles aux différentes stations de São Nicolau. Alors que juillet marque tout de même le début de la saison des pluies, octobre n'en marque pas réellement la fin.

Un phénomène de traîne inégalement observé d'une année à l'autre se manifeste de novembre à mars. Cette traîne concerne plus du quart des observations (quartile supérieur) pour novembre et souvent décembre ; elle est plus rarement observée en janvier et février. Les précipitations éventuelles de cette période sont, bien entendu, peu abondantes.

Sur le continent africain, aux mêmes latitudes (SAINT LOUIS du SENEGAL), des précipitations au cours de cette période ont un caractère beaucoup plus exceptionnel. Peut-être faut-il y voir, plutôt que l'incidence d'eaux océaniques plus chaudes en surface aux îles du CAP-VERT que sur le littoral sénégalais pendant cette période de l'année (la différence de température est de plus de 3°), l'influence de masses d'air polaire des zones tempérées. Quoiqu'il en soit, le poids de ces précipitations est dérisoire : il représente pour janvier, février moins de 3 % du total annuel (à l'exception de PREGUICA, ce qui est sans grande signification du fait du mode de calcul adopté).

En prenant la définition de "mois sec" proposée par GAUSSEN ( $P_{mm} > 2 t^{\circ}C$ ), seule la station de CACHACO aurait en moyenne vraiment, trois mois pluvieux, (août, septembre, octobre).

Les stations de VILA et de PRAIA, avec de 9 à 10 mois secs, feraient la transition avec celles de CALEJAO POSTO et de MORRO ALTO où seuls août et septembre ne sont pas des mois secs.

Enfin pour PREGUICA, même le mois de septembre est un mois sec. Bien entendu l'irrégularité interannuelle des précipitations mensuelles est très grande, ce qui est une caractéristique de la zone climatique de l'île de São Nicolau.

valeurs moyennes du nombre de jours de pluie relevés sur la période d'observation aux différentes stations de l'île.

Le nombre moyen annuel de jours de pluie est donné d'une part par le calcul de la moyenne sur les années complètes (dont le nombre est indiqué entre parenthèses) ; d'autre part par la somme des moyennes mensuelles.

Les périodes d'observations étant de tailles très différentes, ces résultats ne doivent être considérés qu'à titre indicatif pour les stations de courte durée d'observation. Pour CABECALINHO, les résultats très douteux ont été mis entre parenthèses.

### 3.2 LE NOMBRE MOYEN DE JOURS DE PLUIE

Le tableau 3.11 présente mois par mois les

Le nombre moyen annuel de jours de pluie varie de 14 à 17 jours sur les versants nord du MONTE GORDO. On ne note pas davantage de

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Vila	0,34	0,48	0,13	0,00	0,06	0,03	1,06	3,79	4,51	1,70	1,24	0,89	14,37 (29)
Preguiça	0,35	0,50	0,05	0,10	0,05	0,05	0,30	2,50	2,80	1,20	0,60	0,95	9,40 (20)
R. Calhaus	1,40	0,40	0,20	0,00	0,00	0,00	1,40	3,60	2,60	0,60	0,60	0,60	11,4 (5)
Tarrafal	0,16	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	2,20	0,40	0,60	0,40	5,0 (5)
Morro Alto	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,42	2,00	0,28	0,14	0,00	6,0
Morro Braz	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	2,33	4,16	1,00	0,83	0,50	9,33 (6)
Praia Branca	0,40	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00	0,45	3,72	4,63	1,22	0,59	0,40	12,09 (22)
Hortelao	0,83	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,16	3,00	3,20	0,40	0,50	0,40	9,2 (5)
Estancia Bras	0,50	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,33	5,33	5,50	1,16	1,16	0,50	14,83 (6)
Carrical	0,09	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	1,90	2,70	0,50	0,40	0,30	6,8 (10)
Calejao Posto	0,62	0,43	0,12	0,06	0,00	0,06	1,50	5,62	5,10	1,29	1,18	0,62	17,18 (16)
Calejao Campo	0,31	0,25	0,25	0,00	0,00	0,00	1,08	4,13	3,60	1,00	0,23	0,64	13,18 (11)
Cachaço	0,35	0,35	0,04	0,00	0,00	0,09	1,10	5,05	5,61	1,24	0,71	0,48	14,28 (18)
(Cabecalinho)	0,00	0,30	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	2,10	2,20	0,30	0,30	0,20	6,2 (10)

Tableau 3.11 : Nombre moyen de jours de pluie à São Nicolau (entre parenthèses, le nombre d'années de l'échantillon)

jours de pluie à CACHACO qu'à VILA, ce qui n'exclut cependant pas un plus grand nombre de jours de pluie sur les contreforts plus élevés du MONTE GORDO.

A PREGUICA, on n'observe plus en moyenne que 9 jours de pluie par an. Ce nombre tombe à 7 et 5 jours pour CARRICAL et TARRAFAL, valeurs très vraisemblables pour les régions les plus sèches de l'île. La répartition mensuelle donne en moyenne à VILA 1 jour de pluie en juillet, 4 jours en août, près de 5 jours en septembre, moins de 2 jours en octobre et 1 jour en novembre et décembre ; il pleut une fois tous les 3 ans en janvier, une fois tous les 2 ans en février.

Aux autres postes des régions les plus arrosées de l'île, août et septembre reçoivent mois de 6 jours de pluie en moyenne.

### **3.3 LES PRECIPITATIONS MENSUELLES OBSERVEES DE 1979 A 1983**

Les hydrologues de l'ORSTOM ont procédé au cours de leurs travaux à une réfection progressive et complète du réseau pluviométrique de l'île de São Nicolau.

Des stations abandonnées ont été rééquipées de pluviomètres de type Association à bague collectrice de 400 cm<sup>2</sup>. Ces mêmes équipements ont remplacé les pluviomètres au sol à petite surface collectrice installés anciennement par les services portugais.

Le M.D.R a pris en charge la collecte des données pluviométriques. Celle-ci reste difficile du fait des accès délicats à certaines stations en particulier dans la région orientale de l'île. Leur coût exclut l'utilisation d'un réseau dense de stations automatiques ; une solution moyenne d'un réseau de totalisateurs (ou pluviomètres à comptage par cumul des basculements d'augets) aux fins de contrôle des observations des averses journalières peut par contre être envisagée si l'on souhaite préciser réellement le volume de l'apport météorique. Des tableaux (3.12 à 3.16) résument l'information collectée de 1979 à 1983 soit par l'ORSTOM, soit par le M.D.R sur l'ensemble du réseau de pluviomètres de l'île de São Nicolau.

### **3.4 LE CLIMAT ARIDE DE SAO NICOLAU**

L'étude des précipitations annuelles a montré une occurrence hélas non négligeable de précipitations nulles sur la majeure partie de l'île ainsi qu'une répétition dans le temps de périodes de sécheresses dramatiques.

La répartition mensuelle des précipitations moyennes a de même montré la rareté des mois non secs : août et septembre ne peuvent être considérés comme mois pluvieux, suivant GAUSSEN, que sur une petite partie de l'île. Enfin le nombre moyen de jours de pluie dans l'année est très faible.

Tous ces éléments font de São Nicolau une île au climat aride, en reprenant les classifications des géographes et

Tableau 3.12 : PLUVIOMETRIE GENERALE DE L'ILE DE SAO NICOLAU (1979)

	Juillet		Août		Septembre		Octobre		Décembre		TOTAL	
	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours
P1	48.5	2	4.5	2	14.2	2	48.0	2	8.8	1	124.0	9
P2	56.5	2	5.6	2	14.3	2	59.0	2	12.3	1	147.7	9
P3	50.6	2			12.3	1	80.0	3			142.3	6
P4	88.5	2	6.3	3	20.7	1	88.5	3	16.5	1	220.5	10
P5												
P6	90.6	2	7.7	3	10.5	1	114.0	3	52.5	1	274.7	10
P7	98.3	2	6.2	2	18.5	1	93.9	3	13.0	1	229.9	9
P8	96.0	2	5.9	3	11.8	1	104.5	3	32.5	1	250.7	10
P9	100.0	2	10.5	2	16.4	2	158.5	3	11.6	1	297.0	10
P10	95.0	2	10.0	2	21.1	2	156.1	3	5.0	1	287.2	10
P11	126.1	2	20.1	2	18.4	2	138.0	3	3.0	1	305.2	10
P12	92.6	2	15.3	3	13.8	3	136.4	2	3.0	1	261.1	11
P13	101.6	2	13.5	2	15.9	3	112.4	3	3.5	1	246.9	11
P14	35.6	2	4.9	3	8.4	1	104.3	3	0.5	1	153.7	10
P15	30.0	2	3.7	2	6.8	2	82.2	3	2.0	1	124.7	10
P16												
P17												
P18	55.0	2			20.4	1	90.0	4			110.4	5
P19	85.0	2	7.7	1	14.0	1	101.2	3			122.9	5
P20												
P21		2										
P22	42.2	2			2.6	1	21.7	3			24.3	4
P23	55.0	2			3.5	1	62.5	5			66.0	6
P24												
P25												
P26	25.0	2	18.0	1	0	1	92.0	4	3.3	1	113.3	7
P27	38.0	2			8.5	1	97.5	4	7.8	1	113.8	6
P28												
P29												

Pluviométrie journalière maximum : 100.0 mm à Cachaço (P9), le 20-21.07.1979

Tableau 3.13 : PLUVIOMETRIE GENERALE DE L'ILE DE SAO NICOLAU (1980)

	Février		Juillet		Août		Septembre		TOTAL	
	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours
P1	10.5	2	32.8	2	67.3	7	52.5	5	163.1	16
P2	10.4	2	33.9	2	67.1	7	62.5	5	173.9	16
P3	5.0	1	17.0	2	66.5	5	38.0	5	126.5	13
P4	8.0	2	32.6	2	63.6	7	58.5	5	166.3	16
P5										
P6	9.0	2	36.0	2	99.3	7	94.5	5	228.8	16
P7	7.8	1	39.0	2	128.6	7	106.5	5	281.9	15
P8	8.3	2	36.6	2	89.8	6	106.9	5	241.6	15
P9	4.0	1	31.4	2	164.5	7	229.4	5	428.3	15
P10	6.5	1	32.6	2	146.8	6	218.2	5	404.1	14
P11	8.0	1	31.0	2	112.7		193.2	5	344.9	15
P12			43.3	3	109.9	7	132.5	5	285.7	15
P13			29.0	2	101.4		129.6	5	260.0	14
P14	4.6	1	35.0	2	60.6	7	54.6	5	154.8	15
P15	5.2	2	24.2	2	59.0	8	20.7	5	109.1	17
P16					11.0	1	74.6	5	85.6	6
P17										
P18			13.0	1			88.5	3	101.5	4
P19			3.0	1	54.2	3	20.6	2	77.8	6
P20										
P21										
P22					61.7	3	38.0	5	99.7	8
P23			18.0	1	51.0	5	36.0	5	105.0	11
P24					47.4	3	14.3	5	58.7	8
P25										
P26			30.0	1	35.2	4	84.5	5	149.7	10
P27	6.5	2	30.0	2	18.5	4	161.0	3	216.0	11
P28					4.1	1	54.7	5	58.8	6
P29			30.0	1	2.6	2	150.0	3	182.6	6

Pluviométrie journalière maximum : 218.0 mm à Cachaço (P9), le 09.09.1980

Tableau 3.14 : PLUVIOMETRIE GENERALE DE L'ILE DE SAO NICOLAU (1981)

	Février		Juillet		Août		Septembre		TOTAL	
	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours
P1	2.7	1	23.0	1	171.6	7	52.5	4	197.3	6
P2	11.6	2	22.0	1	189.7	7	62.5	4	223.3	7
P3			20.0	1	131.3	5	38.0	2	151.3	3
P4					203.3	7	58.5	3	203.2	3
P5					269.4			4	269.4	4
P6	5.2	1	27.2	1	204.0	7	94.5	3	236.4	5
P7			48.0	1	172.9	7	106.5	5	220.9	6
P8	9.8	2	32.0	1	181.2	6	106.9	3	223.0	6
P9	20.5	2	54.8	1	250.5	7	229.4	6	325.8	9
P10	23.5	2	80.6	1	187.4	6	218.2	5	291.5	8
P11	20.3	2	51.5	1	218.1		193.2	5	269.6	8
P12	15.3	2	42.0	1	257.3	7	132.5	6	314.6	9
P13	13.0	2	43.0	1	251.3		129.6	4	307.3	7
P14	6.0	2	28.0	1	210.0	7	54.6	3	244.0	6
P15	1.2	1	20.3	1	185.4	8	20.7	3	206.9	5
P16	1.9	2			209.8	1	74.6	4	211.7	6
P17										
P18			32.0	1	270.5		88.5	2	302.5	3
P19			22.0	1	133.8	3	20.6	4	155.8	5
P20										
P21										
P22										
P23	19.5	1	21.2	1	132.5	5	36.0	2	173.2	3
P24			16.5	1	17.5	3	14.3	2	34.0	3
P25										
P26			14.0	1	19.0	4	84.5	2	33.0	3
P27			15.5	1	70.0	4	161.0	2	85.5	3
P28			25.0	1	72.0	1	54.7	1	97.0	2
P29						2	150.0			

Pluviométrie journalière maximum : 175,7. mm à Talho (P<sub>5</sub>), le 13.09.1980

Tableau 3.15 : PLUVIOMETRIE GENERALE DE L'ILE DE SAO NICOLAU (1982)

	Janvier		Juillet		Août		Septembre		TOTAL	
	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours
P1	12.2	2			29.7	2			41.9	4
P2	12.2	2			28.5	2			40.7	4
P3	14.5	3			23.0	2			37.5	2
P4	4.8	1			38.3	2			43.1	3
P5	16.1	3	1.5	1	50.2	3			67.8	7
P6					53.9	3			53.9	3
P7	0.2	1			33.6	2			33.8	3
P8	16.2	1			58.0	2			74.2	3
P9	48.9	3			103.5	4	14.7	2	167.1	9
P10	60.0	3			105.5	3	21.8	2	187.3	8
P11	44.0	2			67.5	3	13.5	2	125.0	7
P12	31.9	3	12.5	3	72.8	5	9.2	2	126.4	13
P13					44.2	2			44.2	2
P14	7.5	1			21.8	2			29.3	3
P15	6.2	3			46.9	2			53.1	5
P16	13.8	3			30.4	2			44.2	5
P17										
P18	45.0	3							45.0	3
P19					120.0	1			120.0	1
P20										
P21										
P22	2								5.4	2
P23	2	1			15.3	2			29.7	4
P24	3								2.6	3
P25										
P26					18.0	1			18.0	1
P27					25.5	1			25.5	1
P28					17.5	1			17.5	1
P29	2				42.0	1			48.0	3

Pluviométrie journalière maximum : 120,0. mm à Praia Branca (P<sub>19</sub>), le 29.08.1982

Tableau 3.16 : PLUVIOMETRIE GENERALE DE L'ILE DE SAO NICOLAU (1983)

	Janvier		Août		Septembre		Octobre		TOTAL	
	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours	Pluie	Nb. jours
P1	5.2	2	2.8	4	5.6	2			13.6	9
P2	4.8	2	2.8	2	5.4	2			13.0	7
P3			4.4	2	7.0	2			11.4	5
P4	2.0	1	2.5	2	8.2	2			12.7	6
P5	5.9	2	5.0	2	9.8	3	0.5	1	21.2	7
P6	7.3	2	5.9	4	9.5	3	5.0	1	27.7	9
P7	9.8	2	10.3	5	8.2	2			28.3	10
P8			7.2	3	10.5	2	1.7	1	19.4	6
P9			17.0	5	23.1	2	14.0	1	54.1	8
P10			13.3	5	30.0	2	21.0	1	64.3	8
P11			14.3	5	26.0	2	49.5	1	89.8	8
P12			12.4	4	17.1	2	25.3	1	54.8	7
P13			12.5	3	18.0	2	79.4	1	109.9	6
P14			10.4	3	19.4	2	93.5	1	123.3	6
P15			12.7	4	34.3	2	78.5	1	125.5	7
P16			8.3	1	12.2	2	30.9	1	51.4	4
P17					48.0		135.0	1	183.0	3
P18					42.0		85.0	1	127.0	3
P19					15.5	1	12.0	1	27.5	3
P20										
P21										
P22					5.8	2			5.8	3
P23			4.4	1	6.0	2			10.4	4
P24					5.6	2			5.0	3
P25										
P26					25.0	2	6.5	1	31.5	3
P27					23.5	2	21.0	1	44.5	3
P28					23.5	2	16.5	1	40.0	3
P29					7.6	2	3.5	1	11.1	3

Pluviométrie journalière maximum : 135,0. mm à Camaroes (P<sub>17</sub>), le 01.10.1983

climatologues. L'indice d'aridité, défini par MARTONNE par l'expression  $A = P/(T + 10)$ , où P est la hauteur moyenne de précipitations et T la température moyenne annuelle en °C, est le plus couramment employé dans les études climatologiques. L'information connue sur les températures est des plus réduites ; une température moyenne annuelle de 23°C peut être retenue pour les régions de faible altitude.

Pour VILA, l'indice d'aridité est de l'ordre de 8 ; à PREGUICA il est de 3 ; à MORRO ALTO il serait de 5 ; pour PRAIA BRANCA il est de 9. A CACHACO, où la température moyenne est plus faible, il est encore de 14. Les zones les plus élevées auraient un indice à peine supérieur à 20.

Cet indice, d'autant plus faible que le climat est aride, permet de préciser le caractère d'aridité des régions de l'île différenciées précédemment.

Ainsi d'après la classification de E. de MARTONNE, les régions orientales de l'île et les régions sud avec  $A < 5$  appartiennent à une zone d'hyperaridité.

Les régions de VILA, PRAIA BRANCA, la côte nord ( $A < 10$ ) appartiennent à la zone d'aridité encore désertique.

Seules les régions d'altitude du versant nord du MONTE GORDO appartiennent à la

zone semi-aride ( $10 < A < 20$ ) ou tropicale sèche.

Un autre indice, l'indice xérothermique Ix défini par GAUSSEN comme le nombre de jours secs, affecté éventuellement d'un coefficient k tenant compte de leur humidité relative, durant la série continue de mois secs, conduit sensiblement aux mêmes conclusions.

Ainsi à PREGUICA, avec  $k = 0,9$  Ix est de l'ordre de 320 (valeurs encore supérieures à TARRAFAL et CARRICAL) : le désert absolu. Pour VILA ou PRAIA BRANCA, les mesures d'humidité relative permettent de retenir un k de l'ordre de 230 : région subdésertique.

Ix serait encore supérieur à 200 (205 à 210) à CACHACO.

Ce climat aride de São Nicolau est cependant bien différent de celui rencontré en AFRIQUE dans les déserts continentaux tels le SAHARA.

Il se rattache au climat des déserts côtiers tropicaux et subtropicaux où les températures ne sont pas très élevées, où les amplitudes journalières sont modestes et assez régulières dans l'année, où l'humidité relative reste toujours assez importante ; l'existence de ces déserts paraît liée à la proximité de courants marins froids venus des hautes latitudes. Ici il s'agit du courant des CANARIES de même direction que les alizés, responsable par ailleurs des déserts côtiers du sud marocain et des bordures atlantiques du SAHARA.

#### 4. PRECIPITATIONS JOURNALIERES

Si de très fortes averses concourent à l'observation d'une pluviométrie annuelle excédentaire, elles n'impliquent pas pour autant un gain dans les ressources en eau de l'île : l'eau des ribeiras rejoint rapidement la mer ; elle est perdue pour la réalimentation des nappes, pour l'évapotranspiration des cultures ; elle emporte les sols malgré les efforts de l'homme (ouvrages anti-érosifs). Paradoxalement donc, l'observation d'averses exceptionnelles est un facteur limitant de la reconstitution des ressources en eau.

Nous proposons ici une étude statistique de ces averses exceptionnelles en considérant l'échantillon disponible de précipitations journalières (reçues en 24 h.). Le classement des averses par tranches des hauteurs de

pluies, mettant en évidence des variations dues à l'altitude et aux changements climatiques entre la période actuelle et une période plus humide, sera étudiée dans les chapitres consacrés aux bassins de R. BRAVA et R. GRANDE.

L'intensité des précipitations n'ayant pas fait l'objet de longues observations, nous nous bornerons à donner quelques exemples de hyétogrammes d'averses enregistrées par l'ORSTOM depuis 1978.

#### 4.1 ETUDE FREQUENTIELLE DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES MAXIMALES

Nous avons indiqué dans le tableau 3.17 les 10 plus fortes précipitations observées en 24 heures à chacune des stations pluviométriques de l'île de São Nicolau depuis l'origine

Stations	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vila	36	175,3	158,0	137,2	114,3	106,7	102,0	101,6	101,6	86,4	83,8
Preguiça	22	79,7	63,2	60,0	55,8	50,4	48,8	47,4	42,3	39,4	39,2
R. Calhaus	06	160,0	153,9	140,8	109,4	104	92,8	88	84,8	83,8	76
Tarrafal	06	57	45	42	40	30	24,4	12,2	12	10,2	10
Morro Alto	16	152	104	78,7	60	50,6	49,5	48,0	46,0	46,0	45,0
Morro Braz	06	70,4	52,3	51,0	48,0	39,7	34,4	32,0	31,5	30,1	28,5
Praia Branca	27	150	135	130	125	120	109	107	98	96,8	96,5
Hortelao	06	91,2	59,2	51,2	51,2	48,2	48	38,4	38,4	36,8	35,2
Estancia Bras	06	215	121	98	85	75	56	50	48	45	35
Carrical	11	57,6	51,2	49,0	44,0	40,5	38,7	28,6	25,5	22,0	21,6
Calejao Posto	19	143	85,4	80,0	79,8	71,0	65,8	58,0	53,0	49,5	41,0
Calejao Campo	16	151	101	94,3	80,0	54,0	45,0	40	40	37	37
Cachaço	25	188,1	185,6	158,0	140	112,5	110,5	107,5	101	96,3	95
Cabecalinho	16	125	90,0	80,9	80,0	80,0	62,0	61,0	60,0	54,7	52,0

N : Nombre d'années

Tableau 3.17 : Plus fortes précipitations journalières observées aux différentes stations de São Nicolau (de l'origine des stations à 1977)

des observations jusqu'en 1977. Bien entendu, ces périodes d'observations étant très variables, il convient de considérer ces résultats sur le plan purement indicatif de l'information disponible.

La plus forte averse observée jusqu'en 1977 a été relevée à ESTANCIA BRAZ le 14 octobre 1950 avec une hauteur de 215 mm.

L'étude fréquentielle des hauteurs de précipitations journalières implique de disposer d'un nombre d'années complètes d'observations suffisant pour autoriser un traitement statistique. L'absence du détail journalier pour certains relevés mensuels ou l'absence de relevés conduit souvent à raccourcir la taille de l'échantillon.

Seules sept stations offrent un nombre d'années complètes d'observations relativement important, sans être, et de loin, optimal. Ce sont :

- VILA DE RIBEIRA BRAVA,
- CALEJAO POSTO,
- PRAIA BRANCA,
- MORO ALTO,
- PREGUICA,
- CACHACO,
- CABECALINHO.

Pour ces sept stations, le traitement a consisté après classement des averses journalières à rechercher l'ajustement d'une

loi de distribution du type PEARSON III ou GOODRICH. Mais la loi PEARSON III ne peut pas s'appliquer à des échantillons trop courts et n'aurait pas donné ici de résultats satisfaisants, compte tenu du faible nombre de jours de pluie relevé chaque année à São Nicolau. Seule la loi de GOODRICH a donc permis d'aboutir aux résultats qui vont être analysés ici.

La loi de GOODRICH est une expression de la distribution exponentielle généralisée où les paramètres d'échelle  $s$  et de forme  $d$  sont positifs.

Elle s'écrit :

$$1 - F_1(x_i) = 1 - e^{-\frac{1}{s}(x_i - x_0)^d}$$

avec  $F_1(x_i)$  : fréquence au dépassement

$e$  : exponentielle

$s$  : paramètre d'échelle (même dimension que la variable  $x$  correspondant à l'écart-type de la loi normale)

$x_0$  : paramètre de position

$d$  : paramètre de forme (positif)

$$\frac{1}{x_0^d} = 0$$

ou, avec un paramètre de position

$$1 - F_1 = 1 - e^{-\frac{x}{s}}$$

$$1 - F_1 = 1 - e^{-\frac{x}{\theta}}$$

d'où l'on déduit la hauteur de précipitation journalière correspondant à telle ou telle probabilité d'être atteinte ou dépassée par l'expression :

$$\log x = d \log (\log (1/F_1)/\log e) + \log s$$

$$\log x = d \log (2,302 \log 1/F_1) + \log s.$$

Le calcul de  $F_1$  est obtenu à partir du paramètre de troncage  $F_0$ .

Ce paramètre  $F_0$  permet de calculer le nombre moyen de jours de pluie par an  $N$ .

$$N = (1 - F_0) \times 365,25$$

et la fréquence au dépassement d'une précipitation journalière de probabilité 1 fois en  $r$  années est donnée par :

$$F_1 = \frac{1}{rN}$$

et de probabilité  $r$  fois par an :

$$F_1 = \frac{r}{N}$$

Ainsi pour VILA : le paramètre  $F_0$  calculé est de 0,9583, ce qui donne pour l'ajustement retenu :

$$N = (1 - 0,9583) \times 365,25 = 15,22 \text{ jours}$$

et  $F_1$  pour l'averse de probabilité annuelle :

$$1/15,22 = 0,0658$$

l'averse de probabilité biennale :  $1/30,44 = 0,0329$

l'averse décennale (1 fois en 10 ans) :

$$1/152,2 = 0,00658$$

l'averse dépassée 10 fois par an :

$$10/15,22 = 1/1,522 = 0,658$$

Les résultats de l'analyse statistique sont donnés dans le tableau 3.18. Les premières colonnes indiquent les paramètres de la loi de GOODRICH pour l'ajustement retenu. Les colonnes suivantes se rapportent aux hauteurs de précipitations journalières ayant la probabilité d'être égalées ou dépassées 5, 2, 1 fois par an et une fois tous les 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans, les résultats des périodes de retour les

Station	Paramètres de la loi de GOODRICH				Hauteur de précipitations journalières ayant la probabilité d'être égalée ou dépassée										N = 1/F <sub>1</sub>
	n années utilis.	d	s	F <sub>0</sub>	n fois par an			1 fois tous les n ans							
					5	2	1	2	5	10	20	50	100		
Vila de Ribeira Brava	33	1,362	13,19	0,9583	15,2	34,6	51,6	70,2	97,1	118,8	141,7	173,5	198,6	15,23	
'Calejao Posto)	14	2,398	1,68	0,8993	(8,8	21,8	36,3	55,4	88,1	118,8	155,0	212	262)	(36,8)	
Praia Branca	23	1,704	10,55	0,9604	11,7	33,8	56,3	83,4	125,8	162,4	203	262	311	14,46	
Preguiça	22	1,314	9,14	0,9718	6,0	17,5	27,8	39,1	55,4	68,6	82,4	101,5	116,5	10,30	
(Morro Alto)	14	0,869	25,55	0,9874	(	21,8	36,9	51,1	69,0	82,1	94,9	111,4	123,6)	(4,6)	
Cachaço	20	1,236	17,39	0,9589	19,6	41,4	59,6	79,0	106,2	127,6	149,8	180	204	15,01	
(Cabecalinho)	13	1,185	25,54	0,9799	(7,6	32,2	53,4	76,0	107,6	132,5	158,1	193,1	220)	(7,34)	

Tableau 3.18 : Analyse statistique des hauteurs de précipitations journalières à Sao Nicolau

plus grandes devant être considérés avec la plus grande réserve. La dernière colonne donne N le nombre moyen annuel de jours de pluie calculé. Une analyse critique rapide basée sur la valeur du paramètre de troncage  $F_0$  et par suite sur N, le nombre annuel de jours de pluie, met en évidence des anomalies "criantes" pour les trois postes dont la période d'observation est inférieure à 20 ans :

- CALEJAO POSTO :

N calculé est largement surestimé ;

- MORRO ALTO :

N est probablement sous-estimé, les observations portant essentiellement sur la période sèche ;

- CABECALINHO :

N est sous-estimé en partie pour les mêmes raisons que pour MORRO ALTO. Cette sous-estimation est d'autant plus flagrante que cette station se situe dans une des régions les plus arrosées de l'île. En comparant les relevés de cette station avec ceux de CACHACO, il semble bien que le détail journalier de CABECALINHO comprend des cumuls systématiques de pluies de jours consécutifs.

Ceci explique que les résultats calculés pour ces stations aient été jugés douteux et mis entre parenthèses dans le tableau 3.18.

Nous présentons dans la figure 3.12 les

courbes hauteurs de précipitations journalières / périodes de retour des quatre stations finalement retenues : PREGUICA, VILA, CACHACO et PRAIA BRANCA. Les périodes de retour ont été indiquées en coordonnées logarithmiques. La plus forte précipitation de l'échantillon étudié pour chaque station a été portée sur les courbes.

Ces courbes appellent quelques commentaires :

La distribution des averses journalières extrêmes de PREGUICA rend bien compte des faibles précipitations reçues par les régions méridionales de l'île. Une hauteur de pluie journalière de 100 mm ne serait atteinte que tous les 50 ans. Il y a tout lieu de penser que la distribution des averses journalières à TARRAFAL (côté Sud-Ouest) et CARRICAL (côté Sud-Est) est du même type avec, probablement, des valeurs encore plus faibles pour des périodes de retour identiques.

Pour VILA, son exposition au Nord, mais au débouché de la vallée de RIBEIRA BRAVA, conduit à observer des hauteurs journalières de précipitation assez fortes sans être toutefois comparables à celles de PRAIA BRANCA.

L'obstacle orographique du MONTE GORDO, quelque peu en retrait, n'a qu'une incidence moyenne sur l'abondance des fortes averses. Les averses décennales et vicennales atteignent respectivement 120 et 140 mm.

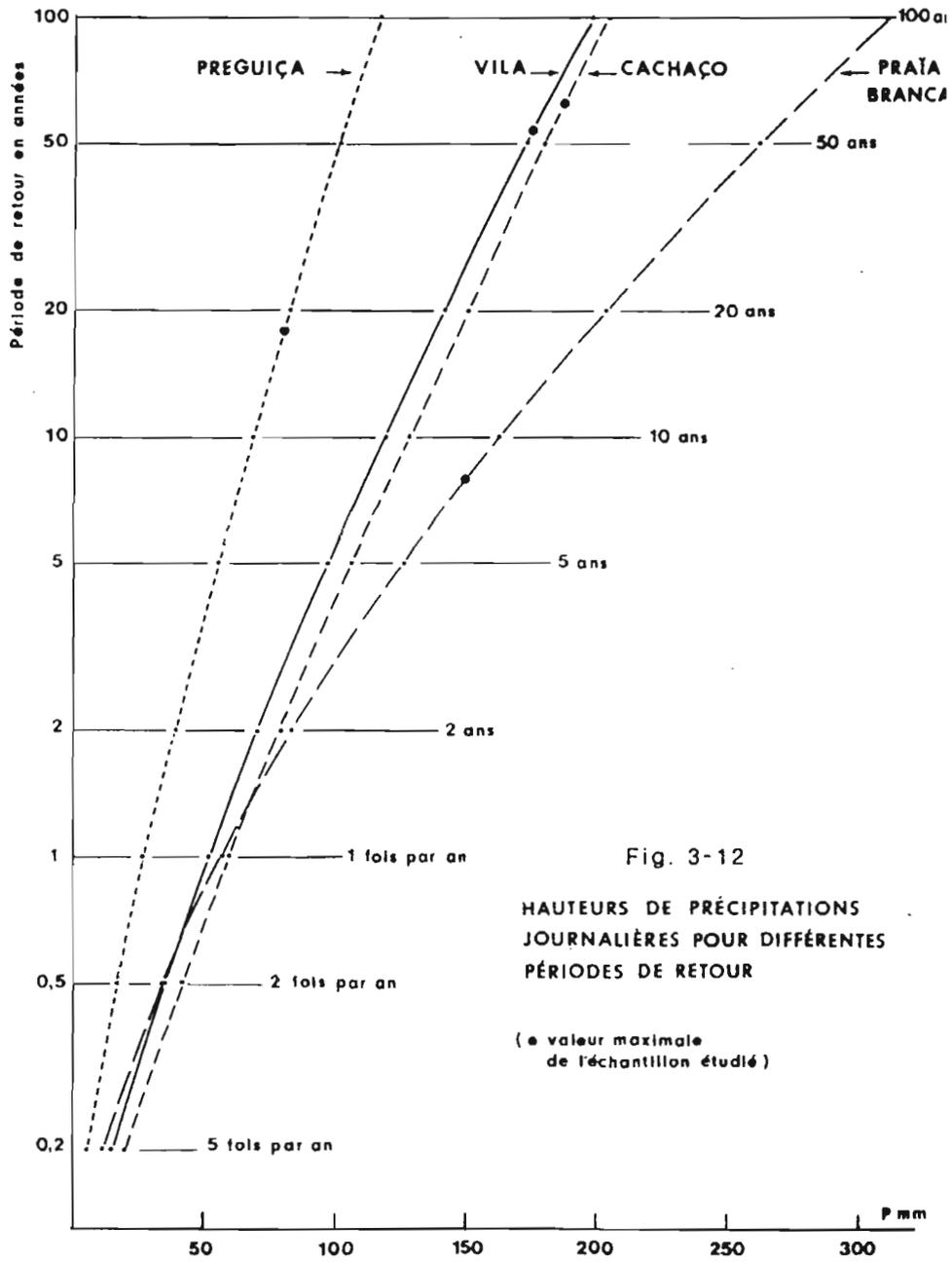


Fig. 3-12  
 HAUTEURS DE PRÉCIPITATIONS  
 JOURNALIÈRES POUR DIFFÉRENTES  
 PÉRIODES DE RETOUR

(• valeur maximale  
 de l'échantillon étudié)

A CACHACO, la station située en altitude au col qui sépare les vallées de RIBEIRA BRAVA et de RIBEIRA GRANDE, les averses journalières sont, pour des récurrences correspondantes, à peine plus abondantes qu'à VILA. On observe souvent en zone intertropicale une baisse en altitude des hauteurs de précipitations exceptionnelles, généralement compensée par un plus grand nombre de jours de pluie. Mais à CACHACO, le nombre moyen annuel de jours de pluie est comparable à celui de VILA, et l'on peut s'étonner alors de ce que les averses journalières de faibles récurrences ne soient pas nettement plus abondantes qu'à VILA (130 et 150 mm pour les averses décennale et vicennale).

A l'examen des pluies journalières des cinq années incomplètes non utilisées dans l'analyse, il est permis de s'interroger sur la représentativité de l'échantillon de 20 années. Sur les 10 plus fortes précipitations observées, six seulement l'ont été sur la période de 20 ans et 4 sur les cinq autres années avec en particulier les averses de 2ème et 3ème rang, de 7ème et 8ème rang.

De plus si l'on considère les 6 dernières années (1978 à 1983) CACHACO a reçu 150 mm le 27/9/1978, 100 mm le 21/9/1979, 203,4 mm le 9/9/1980 et 139,9 mm le 13/9/1981, quatre valeurs qui comptent parmi les 12 plus fortes averses observées à la station dont le maximum maximorum et les 4ème et 6ème rangs.

Ainsi, ces huit années (5 + 3) supplémentaires ont vu, à elles seules, la moitié des plus fortes précipitations reçues à CACHACO en 28 ans.

De ce fait, il paraît prudent de majorer les valeurs déterminées par le calcul.

Par contre, l'ajustement calculé pour PRAIA BRANCA indique de fortes valeurs des hauteurs de précipitations journalières pour les fréquences rares. Il n'est pas certain qu'il y ait eu surestimation des résultats. PRAIA, exposé au Nord-Ouest du MONTE GORDO, est susceptible de "piéger" les grosses perturbations génératrices de précipitations abondantes. Le réseau pluviométrique de l'ORSTOM sur les bassins de RIBEIRA BRAVA et RIBEIRA GRANDE implanté en 1978, a permis de recueillir quelques pluies exceptionnelles d'une abondance qu'on retrouve rarement dans les chroniques d'observations antérieures. Ainsi, le 27 septembre 1978 on a mesuré 293,5 mm à AGUA das PATAS sur le haut-bassin de RIBEIRA BRAVA. Le 9 septembre 1980 218,2 mm ont été relevés au MONTE GORDO (rappel 215 mm mesurés à ESTANCIA BRAZ le 14 octobre 1950). On relève encore 175,7 mm le 13 septembre 1981 à TALHO près de VILA.

On peut aussi évoquer ici quelques événements pluviométriques majeurs dépassant l'échelle de la journée : du 27 au 29 septembre 1978, il est tombé à POMBAS 320,8 mm en trois jours ; du 20 au 22 septem-

bre 1950, CACHACO a reçu 287,5 mm et 322,5 mm sur quatre jours ; RIBEIRAS dos CALHAUS recevait sur les mêmes quatre jours 375,7 mm dont 214,9 mm en deux jours ; citons aussi en 1961, 270 mm mesurés en deux jours à PRAIA BRANCA.

Ces observations complémentaires, les remarques qui ont été faites précédemment sur l'échantillon de CACHACO, amènent à considérer que l'occurrence de très fortes précipitations est plus grande qu'il n'apparaît dans la courbe tracée pour CACHACO. Il paraît raisonnable - et ceci va dans le sens de la prudence - de retenir la courbe de distribution de PRAIA BRANCA pour l'ensemble de la région Nord directement soumise à l'influence orographique du MONTE GORDO : PRAIA BRANCA, vallée de RIBEIRA PRATA, RIBEIRA dos CALHAUS, vallée de COVOADA, ESTANCIA BRAZ, FAJA, hauteurs du MONTE GORDO, CACHACO, vallée de QUEIMADA, haute vallée de RIBEIRA BRAVA. L'averse journalière de probabilité annuelle y serait de 60 mm. L'averse décennale serait de 160 mm ; l'averse vicennale dépasserait 200 mm, et tous les 50 ans (en terme de probabilité) on observerait une pluie de 260 mm.

VILA de RIBEIRA BRAVA se situe en bordure des régions précédentes et marque déjà la transition avec la partie orientale de l'île. Il est probable que la côte nord et l'hubac des reliefs modestes de cette partie de São Nicolau reçoivent des précipitations

journalières dont la distribution des valeurs extrêmes doit s'ordonner suivant les courbes intermédiaires entre celles de VILA et de PREGUICA, le poids de l'une ou l'autre distribution étant variable suivant l'exposition ou l'altitude.

A l'extrémité orientale de l'île, on retrouve les caractéristiques des précipitations des régions méridionales avec, comme cela a été dit pour CARRICAL et TARRAFAL, des hauteurs de précipitations journalières probablement plus faibles qu'à PREGUICA, à périodes de retour équivalentes.

Il est plus délicat d'estimer la hauteur des averses exceptionnelles reçues par les régions d'altitude des versants sud du MONTE GORDO. La prudence veut cependant que l'on retienne l'éventualité de précipitations journalières de récurrences données plus abondantes qu'à VILA.

## 4.2 INTENSITE DES PRECIPITATIONS

Dans l'état actuel des connaissances sur l'île de São Nicolau, il n'est pas possible de faire une étude des intensités des averses.

Un pluviographe a été installé à FAJA da CIMA en 1978 ; d'autres appareils ont été implantés en 1980 en amont de VILA, entre TALHO et POMBAS, en 1981 à CACHACO et au MONTE GORDO.

Les quelques enregistrements dont on dispose montrent soit des averses longues de faible intensité du type océanique ou mousson, soit au contraire des averses dont la durée est relativement brève et les intensités fortes.

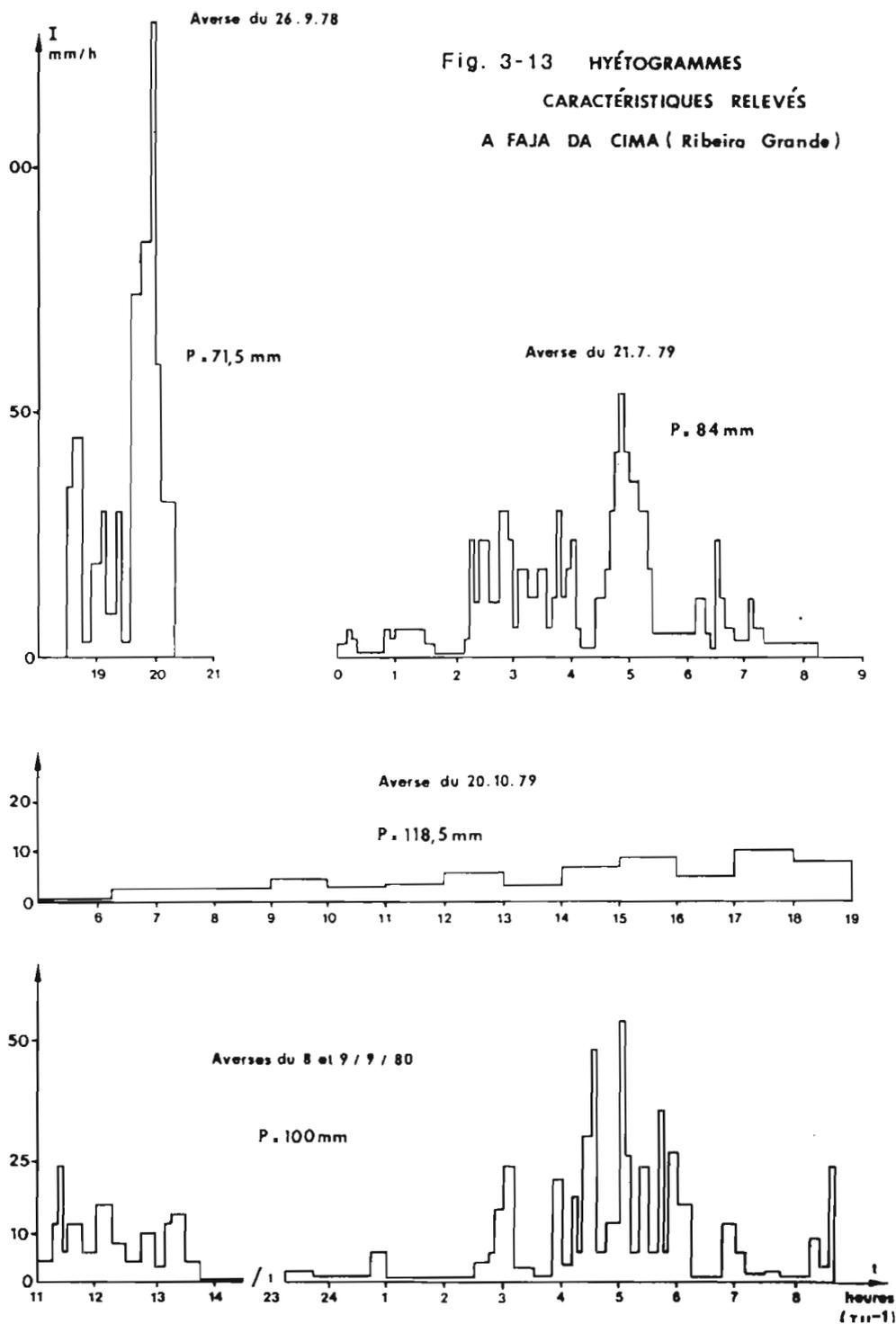
Comme le montrent les exemples donnés figure 3.13, l'abondance d'une averse ne dépend pas de tel ou tel type de précipitations et les averses exceptionnelles procèdent probablement des deux.

Les hyétoigrammes ne présentent pas la forme généralement observée en Afrique Continentale, mais des formes plus irrégulières et souvent des averses intermittentes.

Les "jours fastes" l'île reçoit ainsi plusieurs "grains" espacés...

On relèvera dans l'étude des deux bassins de SAO NICOLAU d'autres exemples de hyétoigramme.

Fig. 3-13 HYÉTOGRAMMES  
 CARACTÉRISTIQUES RELEVÉS  
 A FAJA DA CIMA (Ribeira Grande)





## **DEUXIEME PARTIE**

### **ETUDE DE DEUX BASSINS REPRESENTATIFS DE L'ILE DE SAO NICOLAU**



## DEUXIEME PARTIE

### ETUDE DE DEUX BASSINS REPRESENTATIFS DE L'ILE DE SAO NICOLAU

Deux bassins versants ont été retenus aux fins d'étude des conditions de l'écoulement, du ruissellement et de l'érosion (cf. premiers chapitres).

Le choix s'est porté sur la zone la plus arrosée de l'île, zone qui se trouve être corrélativement la plus peuplée et dont l'agriculture est la moins pauvre. Pour des raisons d'accès, on a retenu les bassins de la Ribeira Grande à Estancia Braz et de la Ribeira Brava à Vila, capitale de l'île de São Nicolau. Ces bassins ont en commun leur position sur le versant nord de l'appareil volcanique du

Monte Gordo, leur relief et leur exposition aux alizés du Nord-Est en saison sèche, aux précipitations en saison humide. Leur substratum géologique différent, comme on le verra plus loin, suggère une éventuelle divergence dans les comportements hydrologiques. Ces deux types de bassins paraissent représentatifs de ceux de Ribeira da Prata, Covoada, Queimada et Praia Branca dans l'île de São Nicolau, de la partie orientale, septentrionale et centrale de Santo Antão, et probablement du Centre et du Nord-Est de Santiago.

Il convient d'ajouter que la forte densité des aménagements (forages, périmètres irrigués etc.) prévus ou réalisés par le M.D.R., le BURGEAP et la Coopération Française, justifiait à elle seule de choisir les vallées de Faja et de Vila pour site d'études hydrologiques devant conduire, a priori, à une meilleure connaissance de la ressource en eau.



## CHAPITRE IV

# PRESENTATION DES BASSINS ETUDIES ET DE LEURS EQUIPEMENTS HYDROMETEOROLOGIQUES



# PRESENTATION DES BASSINS ETUDIES ET DE LEURS EQUIPEMENTS HYDROMETEOROLOGIQUES

## 1 - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET DESCRIPTION DES BASSINS

### 1.1. MORPHOLOGIE ET RELIEF

Adossés aux flancs Nord-Est du Monte Gordo, les deux bassins s'orientent suivant deux axes principaux de drainage :

- de direction SW-NE pour la Ribeira Grande,
- de direction W-E pour la Ribeira Brava

Le bassin de la Ribeira Grande culmine au sommet du Monte Gordo à 1312 m ; celui de la Ribeira Brava culmine à 1029 m. Les exutoires sont respectivement à 30 et 100 m d'altitude (stations hydrométriques). Le bassin de la Ribeira Grande couvre une superficie de 11 km<sup>2</sup> ; celui de la Ribeira Brava, nettement plus petit, ne couvre que 6,7 km<sup>2</sup>.

Le bassin de la Ribeira Brava est moins allongé que celui de la Ribeira Grande. Le grand axe de la R. Brava a 4 km de largeur pour un axe transversal maximum de 2,7 km (rapport 1,48). Le grand axe de la Ribeira Grande mesure 6,4 km pour un axe transversal de 3,4 km (rapport 1,88). Cette différence de forme est traduite également par le coefficient de compacité de Gravélius, obtenu à partir du périmètre et de la superficie des bassins, qui est de 1,42 pour la Ribeira Grande contre 1,21 pour le bassin de la Ribeira Brava (figure 4.1).

Le relief des bassins est particulièrement vigoureux, il suffit pour s'en convaincre de ramener les altitudes maximales supérieures à 1000 m aux exutoires, proches du débouché des ribeiras dans l'océan.

Tranche d'altitude	BVR Grande 11 km <sup>2</sup>	BVR Brava 6,75 km <sup>2</sup>	Tranche d'altitude	BVR Grande 11 km <sup>2</sup>	BVR Brava 6,75 km <sup>2</sup>
30- 50 m	1.3	-	650- 750 m	14.5	6.2
50-150 m	1.9	-	750- 850 m	9.5	1.6
100-150 m	-	4.6	850- 950 m	5.2	0.7
150-250 m	5.1	20.9	950-1029 m	-	0.2
250-350 m	10.5	24.7	950-1050 m	5.7	-
350-450 m	13.0	19.3	1050-1150 m	1.7	-
450-550 m	17.2	13.7	1150-1312 m	1.2	-
550-650 m	14.2	8.1			
Total			Total		

Tableau 4.1 : Répartition hypsométrique

**BASSINS VERSANTS  
DE LA RIBEIRA GRANDE ET DE LA RIBEIRA BRAVA  
ILE DE SAO NICOLAU ( Rép. des îles du Cap-Vert )**

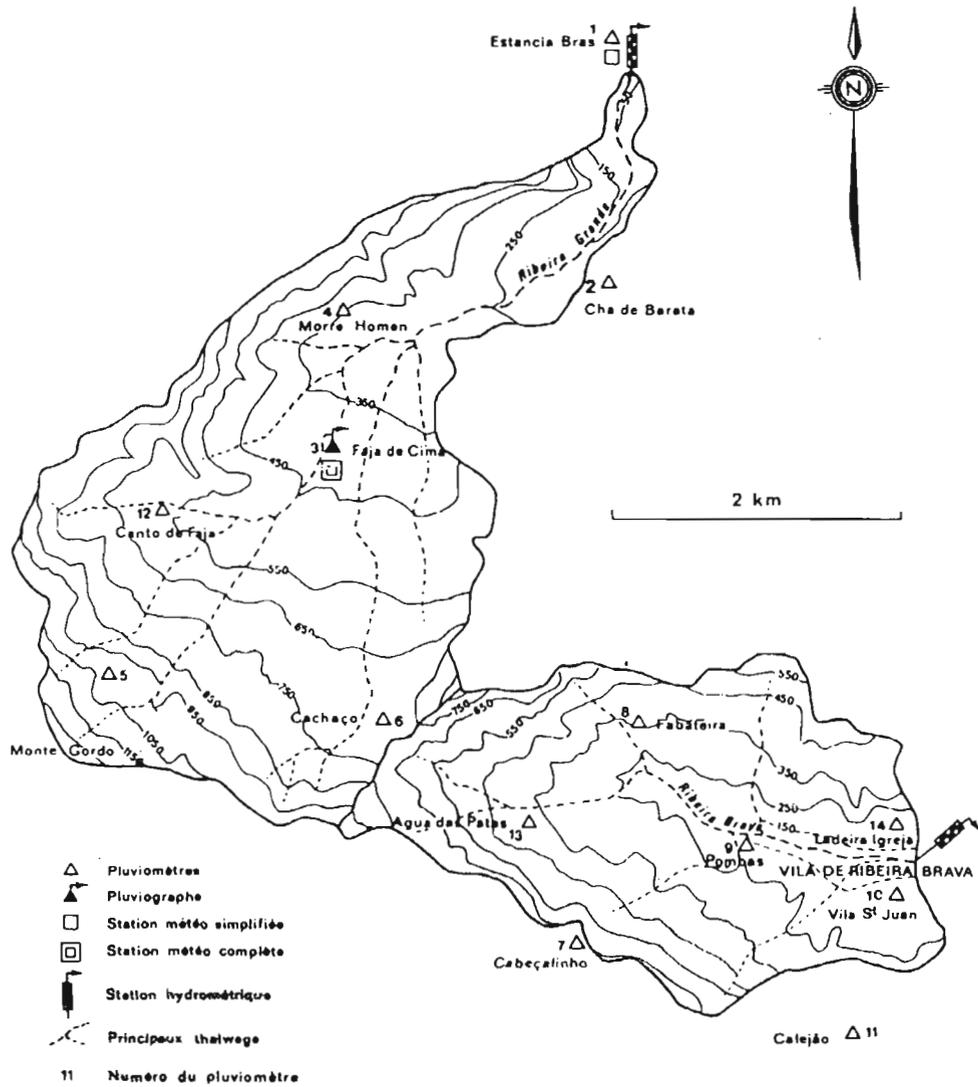


Fig. 4-1 SCHEMA DES INSTALLATIONS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES

L'hypsométrie a été étudiée dans le détail avec le calcul des surfaces partielles pour des tranches d'altitude déterminées (cf. tableau 4.1). Cette répartition, ramenée à des pourcentages de la superficie totale des bassins, a été représentée par les courbes hypsométriques de la figure 4.2. Ces courbes permettent de déterminer l'altitude moyenne de la Ribeira Grande à 565 m et à 350 m pour le bassin de la Ribeira Brava ; ces altitudes moyennes ont une signification limitée mais sont susceptibles toutefois d'être utilisées pour le calcul de paramètres climatiques moyens intervenant dans les bilans. Les indices de pente ont été calculés à partir de cette analyse de l'hypsométrie.

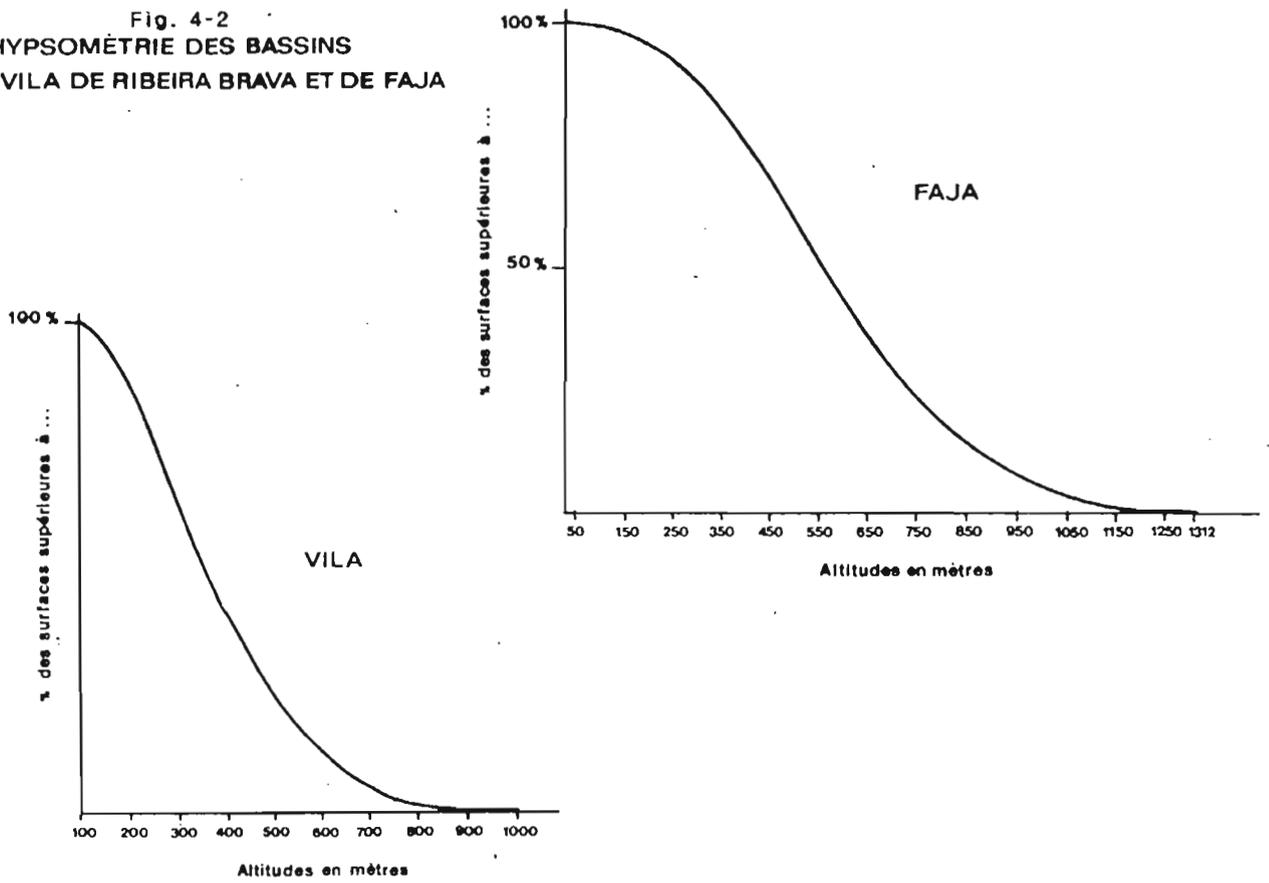
L'indice global de pente ( $I_G$ ), le plus facilement obtenu, est de  $117 \text{ m.km}^{-1}$  pour le bassin de la Ribeira Grande,  $145 \text{ m.km}^{-1}$  pour le bassin de la Ribeira Brava. L'indice de pente de Roche ( $I_p$ ) qui intègre la forme de la courbe hypsométrique présente des valeurs moins contrastées, respectivement de 0,42 et 0,54 pour les bassins de la Ribeira Grande et de la Ribeira Brava. Ces indices rangent ces bassins dans la catégorie de relief la plus élevée des

classifications qui ont été proposées par différents auteurs (6 pour RODIER et AUVRAY (1964), 7 pour DUBREUIL et GUISCAFRE (1971)). Ces classes de relief n'ont d'autre objet que de comparer facilement un ensemble de bassins très disparate ; dans le cas présent, les indices de pente montrent donc un relief plus marqué sur le bassin de la Ribeira Brava ; les valeurs sont susceptibles d'expliquer des comportements hydrologiques différents.

L'examen des courbes hypsométriques montre un profil concave classique (érosion régressive) de bassin montagnard pour la Ribeira Brava et un profil convexe pour la Ribeira grande dont le bombement est dû au remplissage d'une vallée antérieure par d'épaisses coulées volcaniques récentes. Le bassin de la Ribeira Grande a, du fait de ce remplissage, la forme d'une auge, les rebords abrupts ayant une part réduite dans la superficie.

Le tableau 4.2 récapitule les principaux paramètres morphologiques des deux bassins étudiés.

Fig. 4-2  
 HYPSONÉTRIE DES BASSINS  
 DE VILA DE RIBEIRA BRAVA ET DE FAJA



Paramètre	Bassin de Ribeira Grande	Bassin de Ribeira Brava
Surface (A en km <sup>2</sup> )	11	6.7
Périmètre stylisé (P en km)	16.8	11.2
Coefficient de Graveling (k) (1)	1.42	1.21
Longueur du Rectangle équivalent (km) (2)	6.78	3.87
Point culminant (m)	1312	1029
Altitude exutoire (m)	30	100
Altitude moyenne (m)	565	350
Indice de pente Ip (3)	0.42	0.54
Indice global de pente IG m <sup>4</sup> /m (4)	117	145
Dénivelé spécifique Ds (m) (5)	388	375

Tableau 4.2 : Récapitulation des caractéristiques géométriques des bassins

(1) coefficient de graveling  $K_c = 0.28PA^{-1.0}$  (2) Longueur du rectangle équivalent

$$L = 0.887 KA^{\frac{1}{2}} \left[ 1 + \left( 1 - \left( \frac{1.128}{K_c} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

(3) Altitude moyenne et Indice de pente obtenus à partir de b courbe hypsométrique.

$$I_p = L \cdot \frac{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (a_i d_i)^{\frac{1}{2}}}{1}$$

$a_i$ , étant la portion de la surface du bassin comprise entre deux courbes de niveaux consécutives dont la dénivelée est  $d_i$ , et L la longueur du rectangle équivalent

(4) L'indice global de pente est le rapport de la Dénivelée mesurée entre les altitudes dépassées pour 95% et 5% de la courbe hypsométrique à la longueur L du rectangle équivalent, exprimé en m/km.

(5) La dénivelée spécifique est donnée par l'expression  $D_s = IGAL$

## 1.2. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

L'examen du chevelu hydrographique montre des différences notables entre les deux bassins.

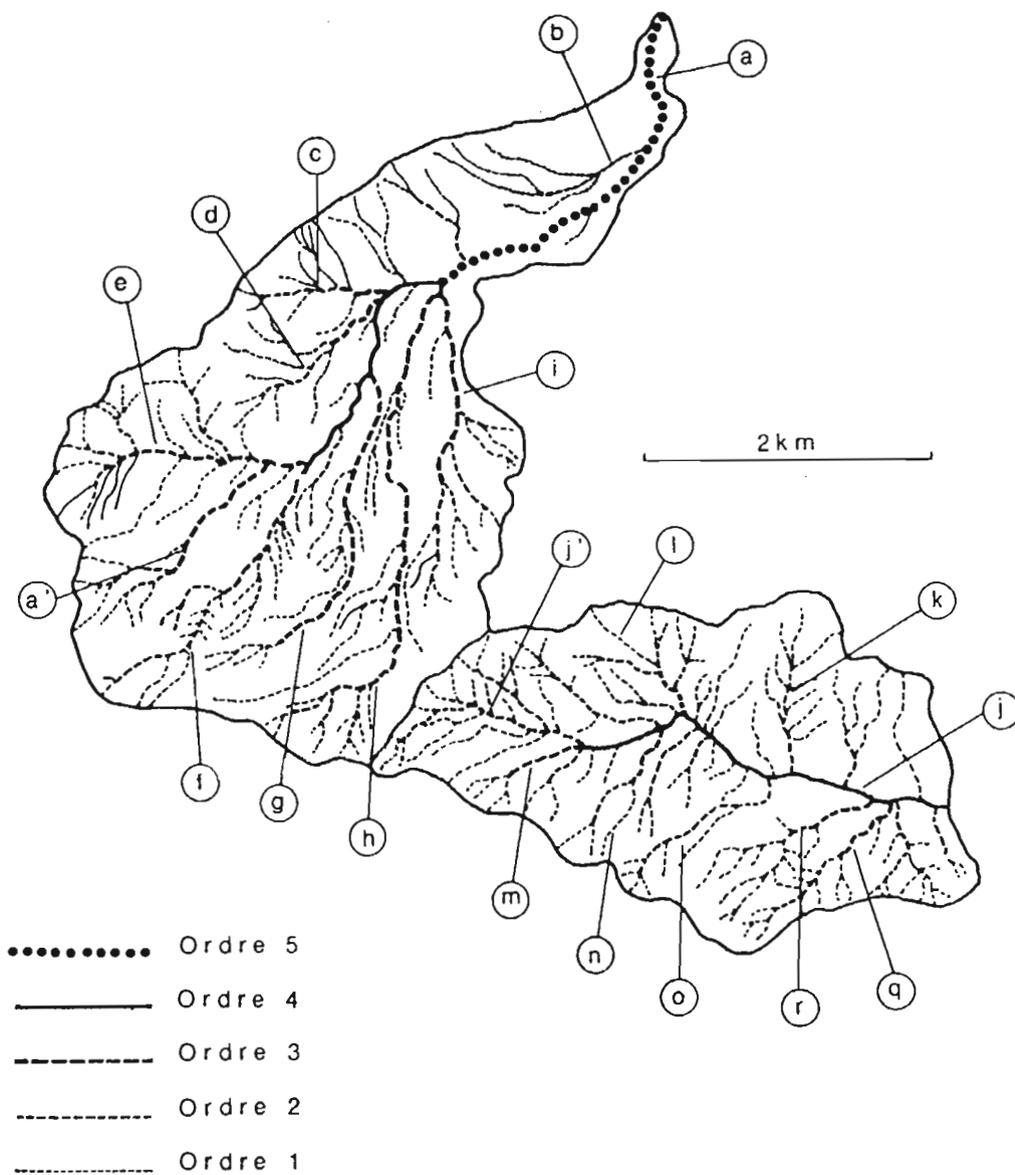
Le bassin de la Ribeira Brava est profondément incisé par la branche principale qui reçoit des branches transversales relativement courtes. Par contre, la Ribeira Grande reçoit dans sa partie aval un certain nombre d'affluents de taille tout à fait comparable à la branche principale et dont l'orientation du cours est pratiquement identique. Cette morphologie du réseau divise

le bassin principal en un ensemble de bassins secondaires très allongés, en forme de lanières, caractéristiques de paysages volcaniques généralement plus mous. Ici le rôle des coulées récentes de Faja est évident : le relief initial de ces coulées a orienté une nouvelle hydrographie.

La carte de la figure 4.3 donne l'image du chevelu hydrographique des bassins étudiés, tel qu'il apparaît sur les cartes d'état-major dont on dispose. On a distingué sur la carte la hiérarchie des différents thalwegs du réseau

Fig. 4-3  
 BASSIN VERSANTS DE LA RIBEIRA GRANDE ET DE LA RIBEIRA BRAVA  
 ILE DE SAO NICO LAU (Rép. des îles du Cap-Vert)

LA HIERARCHIE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE



(classification de Schumm)

suivant la classification de SCHUMM. Celle-ci, en partant du thalweg élémentaire, dit d'ordre 1, tel qu'il peut être identifié sur le document cartographique disponible, suppose que l'on passe à un thalweg d'ordre supérieur

après le confluent de deux thalwegs de même ordre.

Les lettres d'identification portées sur la carte se rapportent aux différents affluents dont les noms sont rappelés ci-après (tableau 4.3).

Bassin de la Ribeira Grande		Bassin de la Ribeira Brava	
a	Ribeira Grande	j	Ribeira Brava
a'	branche amont (Canto)	i'	branche amont
b	R. de Furado	k	R. das Vacas
c	R. de Cabeço de Morreon	l	R. João
d	R. Pico Agudo	m	Agua de Carrice
e	R. do Chafariz	n	R. Maria Palinha
f	R. Lombo de Graça	o	R. das Pombas
g	R. Fundo Antonio Lopez	q	Ribeirão
h	R. do Cachaço		
i	R. do Trago		

Tableau 4.3

Le tableau 4.4 résume l'analyse qui a été faite sur le réseau hydrographique.

La densité de thalwegs d'ordre 1 est de 16,6 par km<sup>2</sup> sur la Ribeira brava contre 11,6 par km<sup>2</sup> pour la Ribeira Grande. Ce chevelu moins dense de la Ribeira Grande est dû aux formes géologiques des coulées volcaniques récentes.

La classification des différents éléments du réseau a abouti à distinguer 5 ordres différents de thalwegs pour la Ribeira grande et quatre seulement pour la Ribeira Brava

Numéro d'ordre des thalwegs	Ribeira Grande					Ribeira Brava			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
Nombre thalwegs	127	32	8	2	1	111	25	6	1
Longueur totale (km)	40.5	13	12	2.25	3	27	11	3,5	2,75
Longueur moyenne (km)	0.32	0.41	0.5	1.12	3	0.24	0.44	0.58	2.75
Rapport de Confluence			3.45					4.21	
Rapport de longueur			1.80					2.28	
Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )			6.45					6.60	

Tableau 4.4 : Caractéristiques du Réseau Hydrographique

De ce fait, on note un rapport de confluence plus fort sur la Ribeira Brava (4,21) que sur la Ribeira Grande (3,45).

Le chevelu plus hiérarchisé de la Ribeira Brava se traduit dans son rapport de longueur (2,28) plus élevé que sur la Ribeira Grande (1,80) où la hiérarchisation n'est pas évidente jusqu'aux thalwegs d'ordre 3.

Ces déterminations ont été obtenues par ajustement de droites moyennes en coordonnées semi-logarithmiques aux données disponibles. Le nombre limité d'ordres de thalwegs conduit à une certaine imprécision (figure 4.4).

La densité de drainage est comparable sur les deux bassins 6,4 à 6,6 km.km<sup>-2</sup>. Ces valeurs ont une signification limitée aux comparaisons faites dans les mêmes conditions d'analyse.

Les figures 4.5 et 4.6 donnent les profils en long de la Ribeira Grande et de la Ribeira Brava ainsi que de leurs principaux affluents.

Elles montrent deux types de profils différents résultant des deux formes de réseau évoquées précédemment. Les profils en long des affluents de la Ribeira Brava évoquent des demi-profiles transversaux du bassin avec des pentes fortes (sur les 60% médian) de 300 à 400 m.km<sup>-1</sup>. Ceci ne se retrouve que pour quelques affluents de la Ribeira Grande (R. FURADO, MORREON...), les plus importants étant orientés sur le grand axe longitudinal du bassin (tableau 4.5).

A la station hydrologique, la Ribeira Grande a une longueur totale de 7,6 km pour une pente moyenne calculée sur les 60% médian de 95 m.km<sup>-1</sup>. Elle se jette en mer environ 300 m en aval de la station de mesure.

A Vila, la Ribeira Brava n'a que 4,6 km de longueur pour une pente moyenne de 90 m.km<sup>-1</sup>. La Ribeira se jette dans l'océan 3 km environ en aval de Vila.

Tableau 4.5 : Pente des différents tributaires du réseau hydrographique des R. Brava et Grande

Caractéristique	Ribeira Grande			Ribeira Brava		
	Ribeira (1)	Longueur (km)	Pente sur 60% médian (%)	Ribeira (1)	Longueur (km)	Pente sur 60% (%)
Cours principal et branche amont	a	7.60	95	j	4.60	90
	a'	2.20	340	j'	1.80	345
Rive gauche	b	1.70	200	k	1.30	285
	c	1.10	270	l	1.10	315
	d	1.40	145			
	e	1.90	195			
Rive droite	f	2.40	340	m	0.90	405
	g	2.90	200	n	1.10	330
	h	4.00	125	o	1.30	240
	i	2.40	150	p	1.60	170
				q	1.60	220

(1) : les lettres se rapportent aux indications de la carte du réseau hydrographique. La branche amont du cours principal est mesurée à partir du confluent avec le premier tributaire cité.

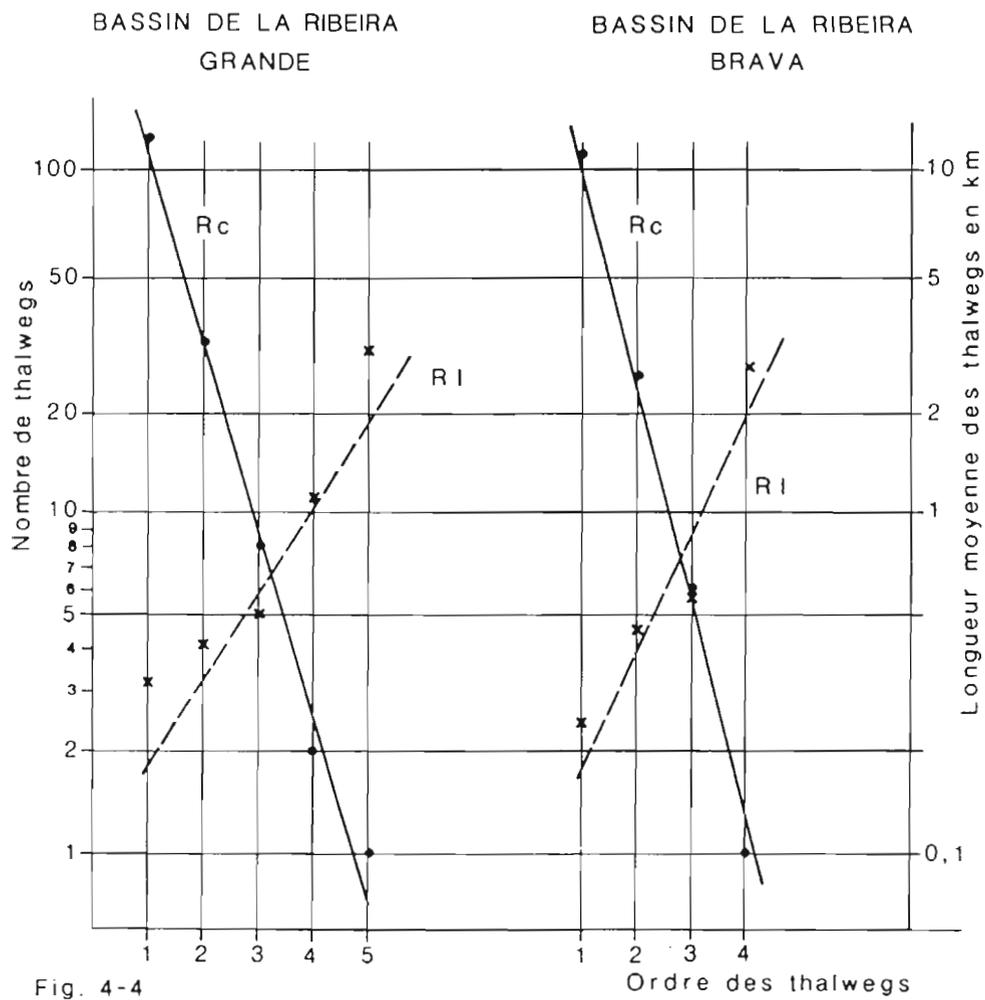


Fig. 4-4

Rapports de confluence (Rc) et rapports de longueur du réseau hydrographique des bassins de la R. GRANDE et de la R. BRAVA

**Fig. 4-5 PROFIL EN LONG DE LA RIBEIRA BRAVA ET DE SES PRINCIPAUX AFFLUENTS**

D'après la carte militaire du service cartographique extérieur du Portugal au 1/25000

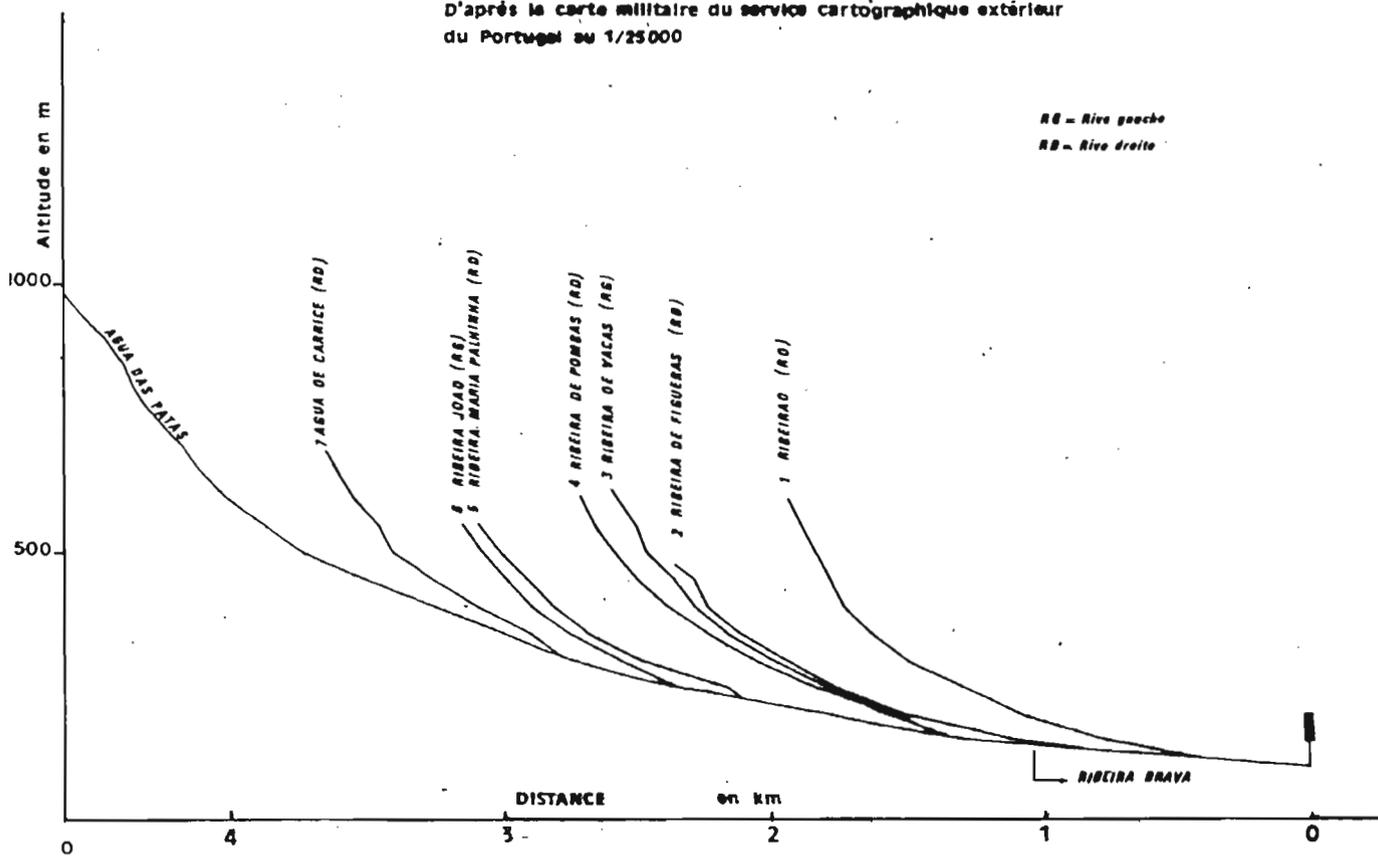
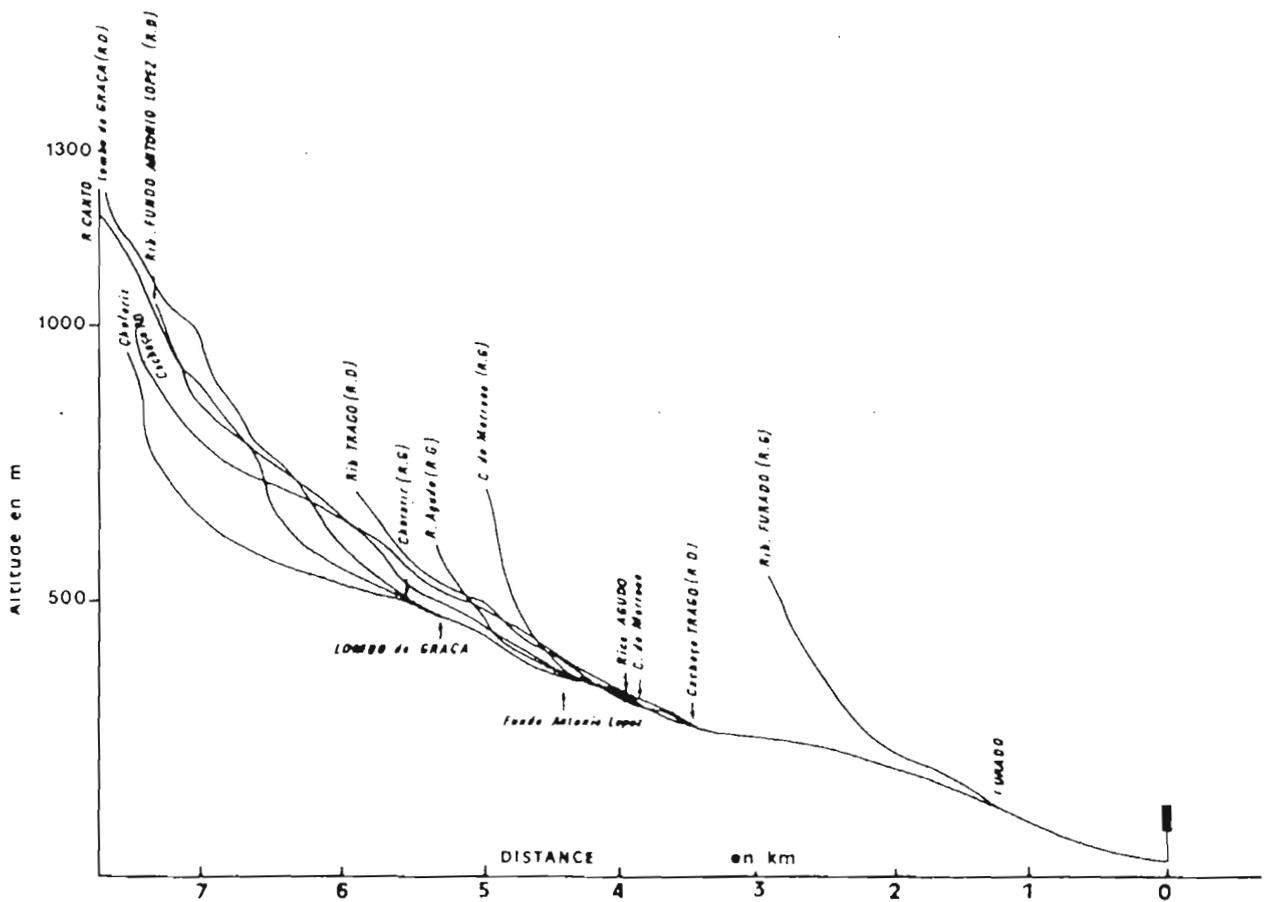


Fig. 4-6 PROFIL EN LONG DE LA RIBEIRA GRANDE ET DE SES PRINCIPAUX AFFLUENTS



### 1.3 GEOLOGIE DES BASSINS

Les formes du relief, les différences géomorphologiques qui ont été soulignées tiennent pour beaucoup à la couverture géologique des bassins.

Les deux bassins sont situés sur flanc nord du volcan primitif de l'ouest de l'île dont toute la partie nord en voie d'effondrement a été largement démantelée par l'érosion. Une tectonique radiale affouillée par l'érosion est à l'origine des grandes ribeiras dont la Ribeira Grande et la Ribeira Brava. Localement, des appareils volcaniques récents ont émis les coulées épaisses de Faja donnant au bassin de la Ribeira Grande son originalité.

Cinq types de formations ont été identifiés sur les bassins :

- le complexe ancien (CA) anté-miocène, limité au bassin de la Ribeira Brava, de faible perméabilité.
- une épaisse succession de coulées (PA) mio-pliocène, basaltes, brèches et conglomérats, de faible perméabilité (ou série intermédiaire).
- les Pyroclastes et cratères (Pi) de bonne perméabilité.
- les coulées récentes (m) associées aux pyroclastes importants sur le bassin de la Ribeira Grande et de bonne perméabilité.

- les alluvions récentes réduites à la basse vallée de la Ribeira Brava.

La figure 4.7 propose une esquisse géologique sommaire des deux bassins.

Quantitativement, les superficies concernées par les différentes formations sont très différentes d'un bassin à l'autre. Elles sont exprimées en pourcentages de la superficie de chaque bassin dans le descriptif ci-après :

#### - Bassin versant de Ribeira Grande

D'une superficie d'environ 11 km<sup>2</sup>, les affleurements de ce petit bassin versant sont, en % :

Pyroclastes et cratères	30
Coulées récentes	40
Epaisse succession de coulées	30
	----
	100

Ce qui correspond à 70 % de formations perméables (coulées récentes + pyroclastes et cratères) et 30 % de formations peu perméables.

#### - Bassin versant de Ribeira Brava

Pour une superficie de 6,7 km<sup>2</sup>, les affleurements sont constitués par :

Pyroclastes et cratères	6 %
Coulées récentes	14 %
Epaisse succession de coulées	34 %
Complexe ancien	44 %
Alluvions	2 %
	-----
	100 %

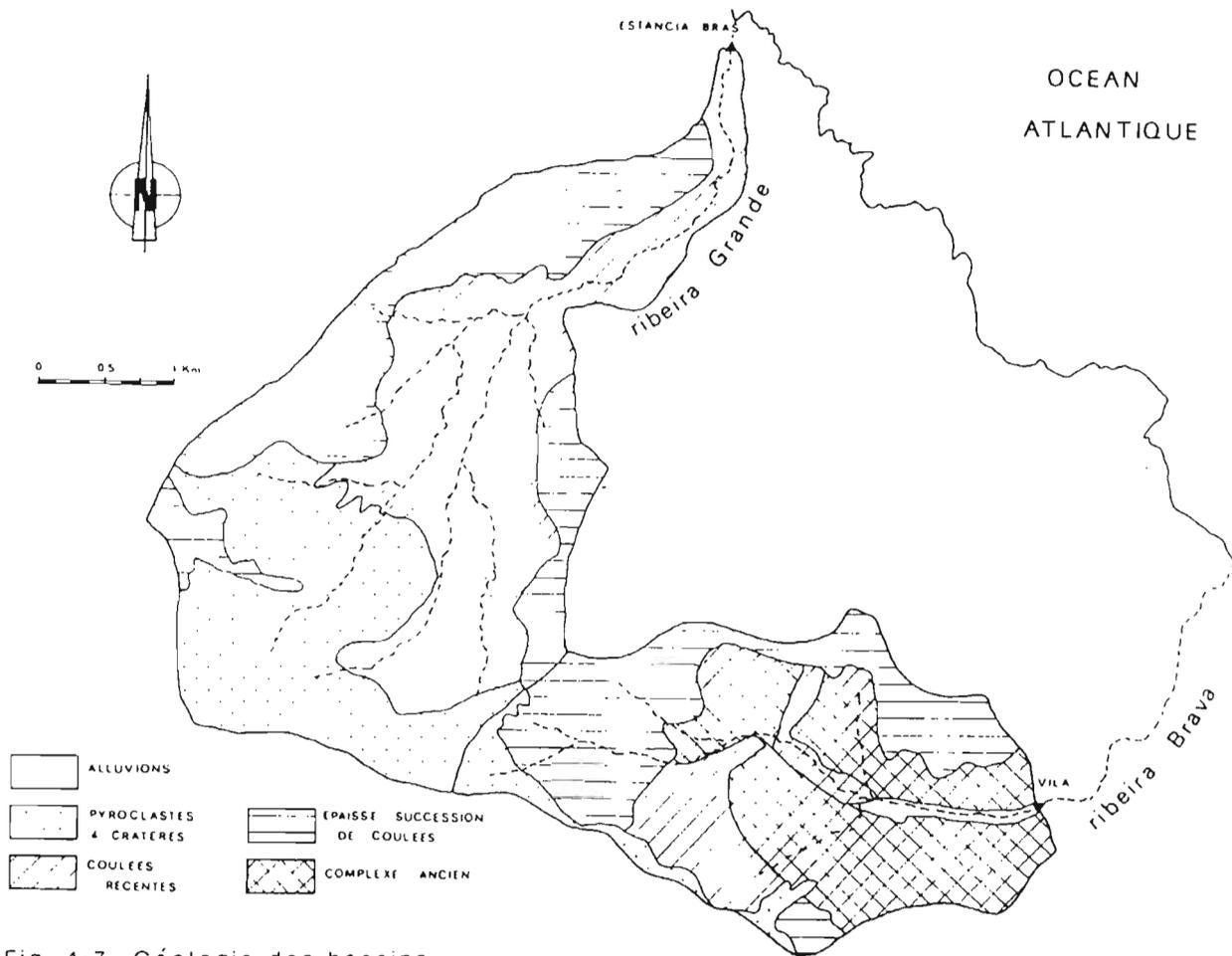


Fig. 4-7 Géologie des bassins

Soit environ 22 % de formations perméables (pyroclastes, coulées récentes, alluvions) pour 78 % de formations peu perméables (série intermédiaire et complexe ancien).

Les proportions entre formations peu perméables et formations de bonne perméabilité sont presque inversées d'un bassin à l'autre.

Le ruissellement apparaît comme nettement plus favorisé sur le bassin de la Ribeira Brava que sur celui de la Ribeira Grande. Il faudra garder à l'esprit, côté infiltration, que les limites hydrogéologiques des bassins (en particulier la Ribeira Grande) ne coïncident pas avec les limites des bassins hydrologiques.

La pédogenèse a été relativement peu active du fait du climat semi-aride et d'une végétation réduite. La couverture pédologique n'a pas fait l'objet d'une cartographie des sols.

On observe le plus souvent des lithosols volcaniques légers et riches lorsqu'ils n'ont pas été lessivés par le ruissellement et qu'ils sont protégés localement sur les surfaces cultivées.

Bien qu'il n'y ait pas d'épandages alluviaux importants du fait de l'étroitesse des vallées, on peut rencontrer dans les bas-fonds des Ribeiras des sols colluvionnaires assez fertiles mais très localisés. Les bas de versants sont souvent constitués d'accumulations grossières.

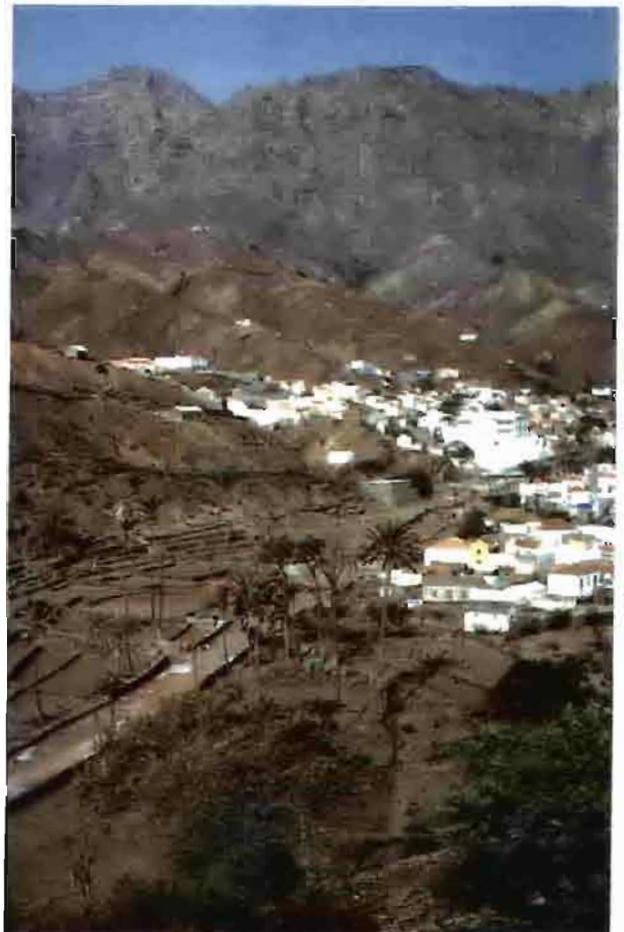
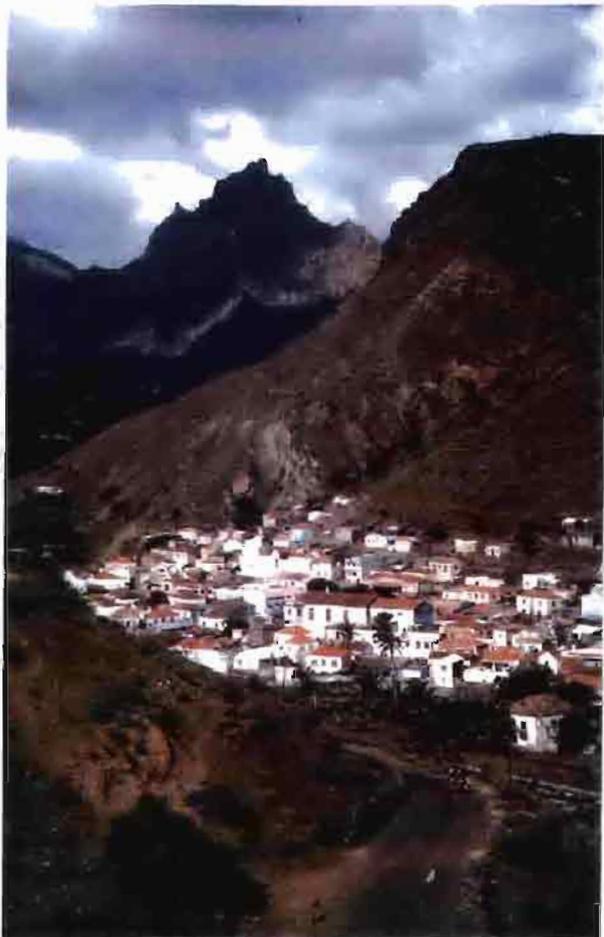


Page précédente :

- 1 : Vue générale sur la partie aval du bassin de la Ribeira Brava avec Vila au fond.  
(Photo J.C. Olivry).
- 2 : Détail de zones aménagées pour la culture en terrasses. Les murettes sont en pierres sèches.
- 3 : Bassin de la Ribeira Brava ; habitat dispersé, cultures en terrasses. Remarques de la couverture nuageuse.  
(Photo R. Gallaire).

Page ci-contre :    1       2  
                          3       4       Le bassin de la Ribeira Brava.

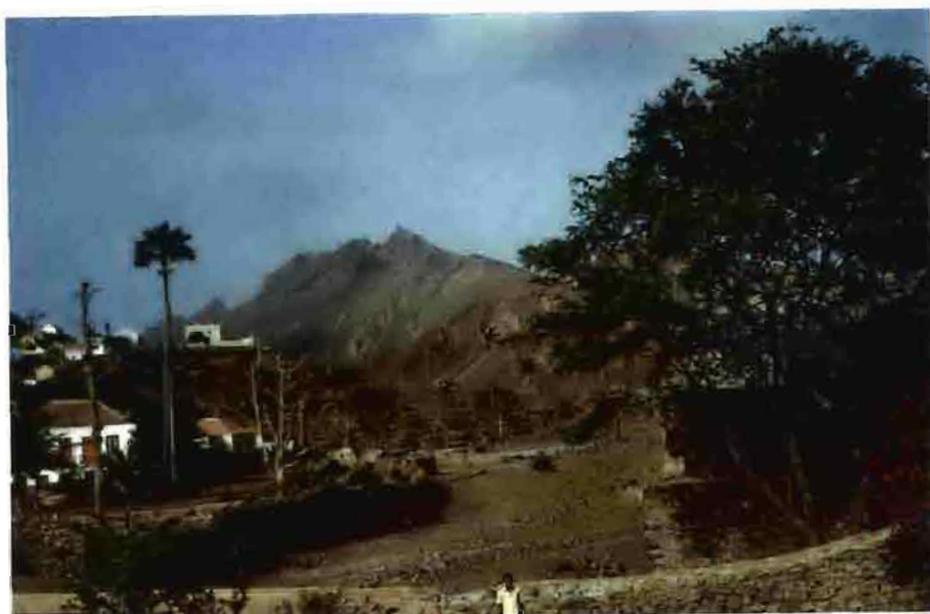
- 1 : Lacets de la route muletière accédant à Cachaço ; sisal au premier plan.
- 2 : Col de Cachaço, contreforts du Monte Sentinha.
- 3 : Vila da Ribeira Brava, vue vers l'amont du bassin (col de Cachaço et Monte Sentinha).
- 4 : Autre vue de Vila, avec les jardins anciennement irrigués et la Ribeira Brava canalisée.  
Au fond, les monts Degolada et Cachacinho.  
(Photos J.C. Olivry).



Ci-contre :

1 et 2 : La Ribeira Brava en amont de Vila (1) et en aval (2).

3 : Un aspect du bassin amont de la R. Brava.  
(Photos J.C. Olivry).









## 2- EQUIPEMENT DES BASSINS ET CONTENU PREVISIONNEL DES TRAVAUX

### 2.1. LE RESEAU DE MESURES

Les installations ont été réalisées par R. CALVEZ, après instruction et choix des implantations par J. LERIQUE. Elles ont été complétées au fil des ans par les différents hydrologues intervenus dans l'île (cf. figure 4.1).

#### 2.1.1. Stations hydrométriques

Les stations devaient permettre le contrôle des débits liquides (et solides) transitant aux exutoires des deux bassins étudiés.

- La station de Vila sur la Ribeira Brava est installée au pont routier reliant les deux parties de la ville au niveau de la place de l'Eglise et, en aval d'une section rectiligne bien canalisée sur ses rives depuis l'esplanade.

Elle comprend une station limnigraphique comprenant trois mires limnimétriques et un limnigraphe à flotteur de marque OTT, type X ; le diagramme est placé sur tambour cylindrique et la vitesse de déroulement a été choisie pour une révolution journalière. Le tout est placé au coin amont du pont en rive gauche.

La section de mesure des débits était définie par la section aval du pont. Il était en

particulier prévu d'explorer le champ de vitesses du courant à partir d'un moulinet placé en tête d'un saumon de 50 kg descendu sur des verticales présélectionnées à l'aide d'une cyclopotence mobile avec treuil.

Il s'avèrera dès la première crue que cet équipement n'est pas approprié aux fortes vitesses du courant.

Au droit du pont, la section a 12,5 m de large, des nivellements précis seront régulièrement effectués aux fins de contrôler l'évolution de la section (cf. chapitre suivant). Des mesures aux flotteurs sont prévues sur une section longitudinale matérialisée de 60 m de longueur à l'amont du pont.

Enfin, deux échelles à maximum (1) ont été installées en septembre 1982 pour matérialiser

---

(1) Les échelles à maximum (conception artisanale) sont composées de tubes Mills, percés de trous, d'une longueur de 2 m placés verticalement, autant que possible dans une partie protégée du lit (fixation par ancrage du bas dans béton ou colliers Mills rattachés à jambes cornières de soutien). Un bouchon ferme la partie supérieure du tube abritant l'intérieur de la pluie. A l'intérieur du bouchon, un boulon est prévu pour attacher avec du fil de fer l'échelle à maxi proprement dite, constituée d'un morceau de cornière d'aluminium ou d'un double mètre aluminium (type pliant) dont une face supporte le ruban qui se décolore à l'eau. L'installation étant nivelée par rapport à une borne repère ou une autre échelle existante, le bouchon du tube Mills est vissé jusqu'à un repère. Pour faire la lecture, on sort la règle support du ruban et on la place à la hauteur correspondante le long du tube Mills d'où l'on déduit le niveau atteint, par rapport à la côte nivelée du sommet du tube par exemple,...

liser la pente de la ligne d'eau des maximums de crue. La tête de l'échelle aval est à 5 cm en dessous de la tête de l'échelle amont.

Le zéro de l'échelle est à 1,723 m en-dessous d'un repère matérialisé par le coin supérieur d'un fer en U servant d'appui amont au fût du limnigraphe.

- *La station d'Estancia Braz sur la Ribeira Grande* est installée trente mètres en aval du radier de la route menant au village d'Estancia Braz qui surplombe la station. Les travaux d'installation de la station limnigraphique ont commencé le 26 juin 1978 par le creusement en rive droite, dans le basalte, d'un puits permettant d'encasturer le fût du limnigraphe (grâce à la participation du BURGEAP et en particulier de Henri CHAUDANSON, et de ses moyens techniques). La station est constituée de trois mires limnimétriques (élément d'échelle de 1 m) et d'un limnigraphe à flotteur OTT X, à rotation journalière.

La section de mesures des débits est située au droit des échelles. Elle comprend pour les basses eaux un petit canal bétonné pour mesures au micromoulinet ou par capacité ; le charriage des pierres nous a fait renoncer à l'installation du seuil jaugeur en plastique qui était prévu (Neyrtec).

Pour les moyennes et hautes eaux, on a prévu une station téléphérique ; celle-ci est constituée d'un transporteur aérien NEYRPIC prévu pour une portée de 50 m, avec un treuil de positionnement et treuil de descente, saumon

de 50 kg et moulinet Neyrflux. L'ensemble double-treuil est à poste fixe dans un abri en maçonnerie.

Une borne située à côté de l'abri est à 4,121 m au-dessus du zéro de l'échelle limnimétrique.

En septembre 1982, deux échelles à maximum ont été installées à la station. Distantes de 32 m, elles présentent une dénivelée entre les têtes d'échelle de 1,388 m.

Les figures 4.8 et 4.9 reprennent les caractéristiques des équipements utilisés.

### 2.1.2. Le réseau pluviométrique

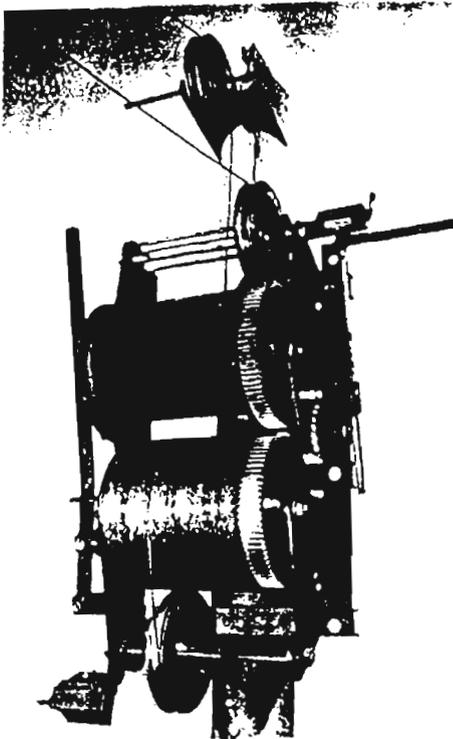
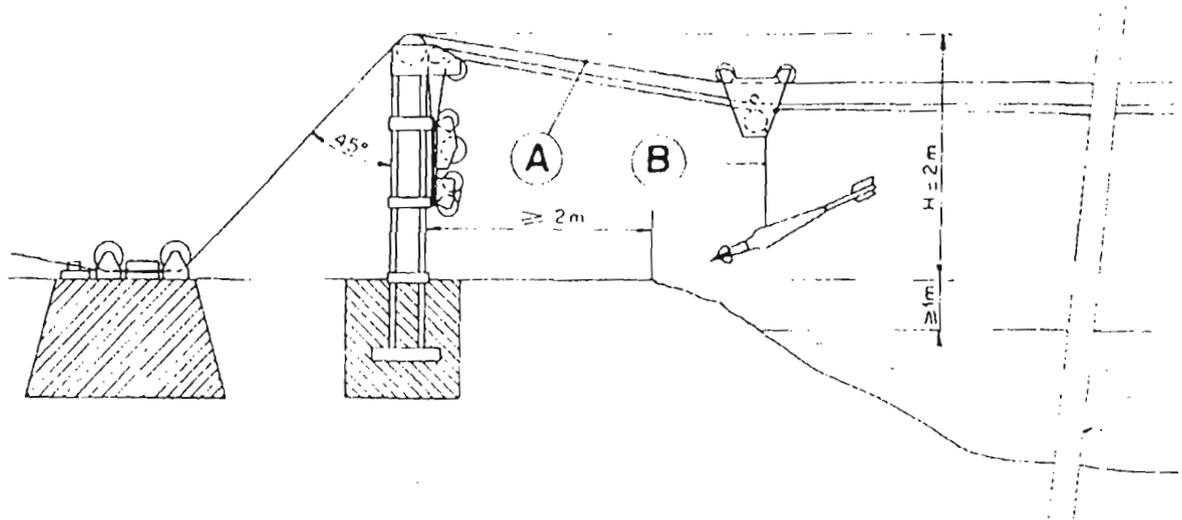
La carte de la figure 4.1 indique l'emplacement des pluviomètres installés sur les bassins.

Ce réseau est constitué de pluviomètres du type Association dont la bague réceptrice de 400 cm<sup>2</sup> de surface est à 1 m au-dessus de la surface du sol. Les caractéristiques des stations ont été indiquées dans le tableau 3.1 au chapitre III.

Les relevés sont journaliers en période de "saison des pluies" et sont effectués par des observateurs sur le terrain et des agents du M.D.R.

En cours d'étude, nous avons implanté des pluviomètres totalisateurs pour contrôle de certaines stations isolées.

TÉLÉPHÉRIQUE STANDARD RÉF. 2441



telepherique standard  
portee moyenne - ref. 2441



Saumon avec detecteur de bois

Fig. 4-8 Equipements hydrométriques NEYRPIE utilisés  
à Estancia Braz (R.Gande)

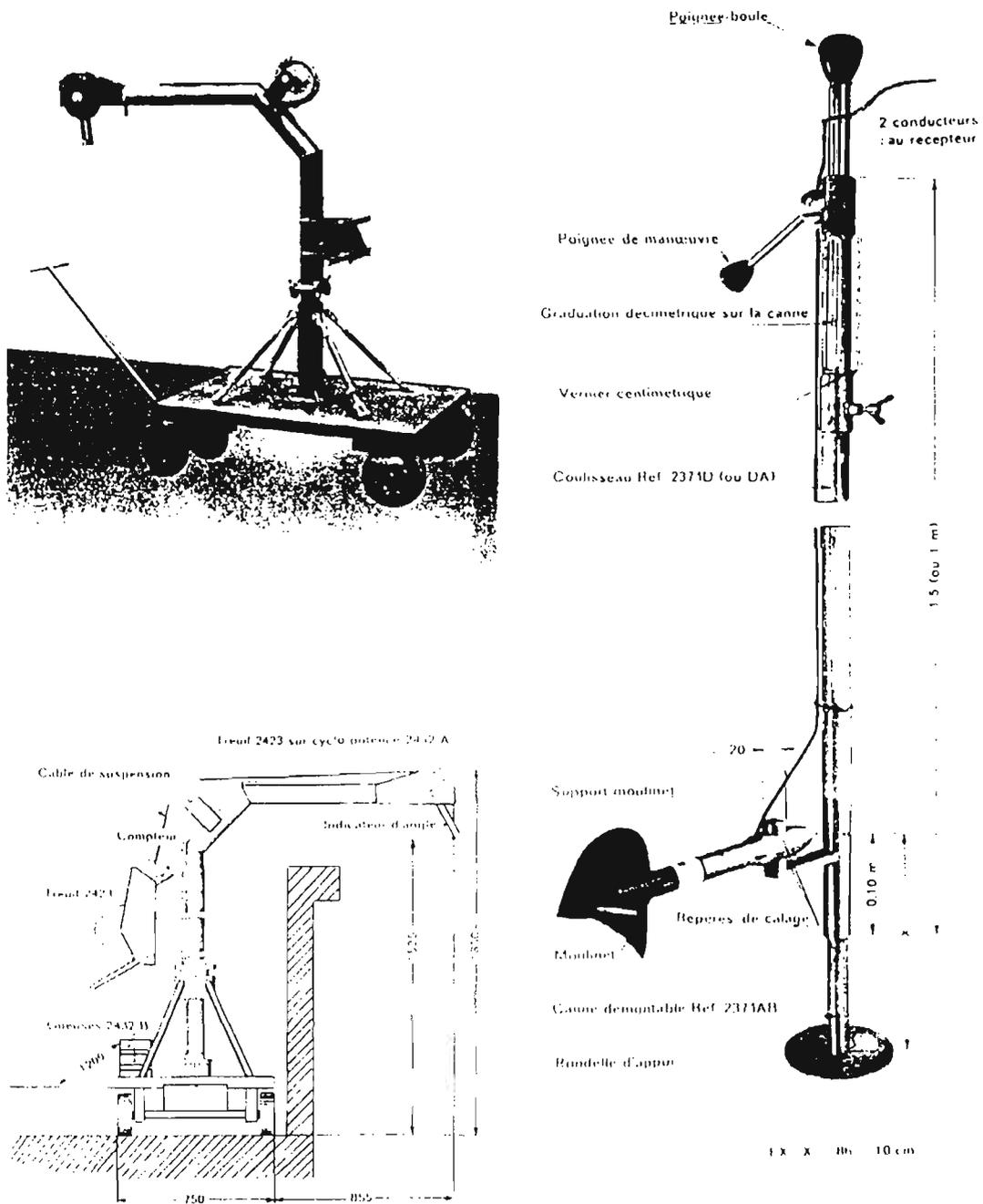


Fig. 4-9 Equipements hydrométriques NEYRPIC utilisés à Vila

(R.Brava)

Le poids des mesures effectuées sur chaque poste a été déterminé par la méthode de Thiessen. Les coefficients de Thiessen, permettant le calcul de la pluie moyenne pour chaque bassin, sont indiqués ci-après en % :

**Bassin de la Ribeira Brava**

Cachaço	10
Agua des Patos	16,5
Cabecalinho	10
Fabateira	19,2
Pomba	24,7
Calejao	2,5
Ladeira Igreja	8,7
Vila St Joa	8,4

**Bassin de la Ribeira Grande**

E. Braz	1,7
Cha de Barata	9,4
Morre Homen	16,0
Faja da Cima	19,7
Canto de Faja	18,5
Monte Gordo	18,7
Cadraço	18,7

Nous devons souligner ici que cette méthodologie de calcul a été utilisée concurremment à la méthode des isohyètes dont le dessin tient compte de l'incidence du relief particulièrement évidente sur ces bassins.

Sur le plan pluviographique, l'équipement est resté très insuffisant. Dans un premier temps, un seul pluviographe était installé à Faja de Cima. L'appareil à augets basculeurs, de

marque PRECIS-MECANIQUE (Tambour à rotation journalière) a été le seul enregistreur jusqu'en 1981. Des pluviographes complémentaires (Richard à auget basculeur unique et à rotation hebdomadaire) ont été installés en juillet 1981 à TALHO au coin du bassin de la Rio Brava et au quartier JAN JOAO de VILA. En 1982, deux nouveaux pluviographes Richard ont été mis en service à Cachaço et au Monte Gordo. Les faibles pluies des dernières années d'études n'ont pas permis de valoriser ces installations nouvelles provenant d'équipement en stock à l'ORSTOM à DAKAR.

**2.1.3. Les stations météorologiques**

Le choix de FAJA pour la station météorologique principale du projet s'explique par le projet cap-verdien d'installer à VILA de RIBEIRA BRAVA la station météorologique du M.D.R. Le projet ne s'est pas réalisé pendant la durée des études ORSTOM et on peut donc, a posteriori, regretter le choix de FAJA dont l'éloignement de VILA n'a pas permis le suivi souhaité par les équipes du M.D.R.

La station de FAJA de CIMA a reçu les équipements suivants :

- 1 Abri météorologique contenant :
  - 1 psychromètre pour mesure de l'humidité (thermomètre sec et humide)
  - thermomètres à minima, à maxima
  - 1 évaporomètre Piche
  - 1 thermographe
  - 1 hygrographe

- 1 pluviographe Précis-Mécanique déjà cité avec sa guérite et une bague réceptrice de 400 cm<sup>2</sup>
- 2 pluviomètres Association placés au sol
- 1 pluviomètre à lecture directe en plastique SPIEA
- 1 bac colorado type ORSTOM (1m x 1m x 0,6 m) enterré
- 1 bac de classe "A" circulaire, cuve circulaire en inox fabriquée par la Météorologie Nationale Française et placée sur le sol, avec vis et vernier pour la mesure.
- 1 pyranomètre KIPP et ZONEN associé à
- 1 intégrateur CIMEL électronique (rayonnement solaire)
- 1 anémomètre totalisateur LAMBRECHT 1440.

En dehors des problèmes de suivi déjà évoqués, quelques malveillances ont dû être déplorées ; le vol d'un premier intégrateur de rayonnement et les pannes successives du second n'ont pas permis de recueillir les données de base nécessaires à une estimation du bilan énergétique.

Une station météorologique secondaire a été installée à ESTANCIA BRAZ. Elle comprenait les équipements suivants :

- 1 abri météorologique (petit modèle) avec :
- 1 psychromètre
  - des thermomètres à minima et à maxima
  - 1 évaporomètre Piche
  - et 1 pluviomètre à lecture directe SPIEA

## 1.4.1. Autres équipements sur le terrain

2.1.4.1. Au Monte Gordo, deux "capteurs de brouillard" ont été installés sur le versant Nord au Monte Gordo en 1981, l'un à 850 m d'altitude au lieu dit Caminho, l'autre à la Case Forestière à 1050 m. Ces "capteurs de brouillard" décrits dans le chapitre relatif à ces mesures ont été conçus par J. COLOMBANI. Ils sont pour l'essentiel constitués d'un cylindre en grillage moustiquaire sur lequel se condense l'eau des nuages et du brouillard ; cette eau est récupérée et la précipitation correspondante est enregistrée.

2.1.4.2. Hors des bassins, des équipements complémentaires ont été installés pour la mesure des écoulements et des crues en 1981.

1° sur la Ribeira de Porto Velho (PREGUICA), deux échelles à maximum distantes de 58 m dont les têtes ont 1,80 m de dénivelée entre elles.

2° sur la Ribeira de Areia, près de Tarrafal, deux échelles à maximum distantes de 90 m, dont la dénivelée (entre les sommets des échelles) est de 6,948 m.

3° au Barrage de Campo do Porto : une échelle limnimétrique au déversoir du barrage, un limnigraphe OTTX en amont (pour remplissage et déversement), deux échelles à maximum (dénivelée de 0,42 m, distance 51 m), un pluviomètre et un pluviographe Richard.



Page précédente :

- 1 : Station de Vila da Ribeira Brava du pont limnigraphe OTT et échelles limnigraphiques
- 2 : Station de la Ribeira Grande a Estancia Braz R HOORELBECKE contrôle le limnigraphe OTT X Un ouvrage en beton régularise la section , l'abri en maçonnerie abrite les installations phériques prévues pour la mesure des débits
- 3 : Station de Campo di Porto au barrage du MDR Aucune crue n'a été observée sur la période de suivi du limnigraphe contrôlé ici par Y LE TROQUER.  
(Photos J.C. Olivry)

Ci-dessous : Vue partielle de la station météorologique de FAJA da Cima installée par l'ORSTOM en 1978.  
(Photo J.C. Olivry)



Ces équipements sont restés inopérants pendant la période d'étude de 1981 à 1983 faute d'événement hydropluviométrique notable.

2.1.4.3. Sur les bassins et dans l'île, citons pour mémoire le réseau pluviométrique que nous avons remis en place et le réseau de forages et piézomètres installés par le BURGEAP et dont nos équipes ont assuré partiellement le suivi (niveaux piézométriques des nappes) et des prélèvements pour analyse de la qualité des eaux.

## 2.2. LA MISSION HYDROLOGIQUE DE VILA

### 2.2.1. Ses moyens

Pendant la durée des études les équipes hydrologiques ont été basées à VILA. L'hébergement des hydrologues a généralement été pris en charge par l'Administration Cap-verdienne, sauf autres dispositions prises par les intervenants (locations). Les bureaux et magasins ont été partagés pendant un temps avec la Mission Française de Coopération ; de fait, cette cohabitation limitée aux 3 ou 4 mois de "saison des pluies" ne posait pas grand problème si ce n'est l'encombrement permanent de locaux par nos équipements. Pour les trois dernières années d'étude, des locaux propres à l'ORSTOM ont été loués.

Les moyens de déplacement consistaient initialement en une citroën Méhari et un Pick Up Toyota. Affectés à la mission hydrologique,

ces véhicules ont largement été utilisés par les autres intervenants du projet entre les saisons des pluies ; une grande partie de "l'énergie" des hydrologues a été consacrée à la remise en état de ces véhicules et à l'acheminement de pièces de rechange depuis DAKAR. Rapidement hors d'usage, ces voitures ont été réformées ; en 1982 une jeep Land Rover chassis court a été achetée par l'ORSTOM et envoyée directement à Mindelo pour São Nicolau. L'"agressivité" du réseau routier (nombreux virages, fortes pentes, pavés de basalte, etc.) explique la faible longévité des véhicules et des pneumatiques.

L'infrastructure "Laboratoire" de VILA comprenait différents équipements :

- en complément des moulinets et équipements NEYRPIK, un moulinet ARKANSAS, un moulinet C31 et un micromoulinet de marque OTT (en appui depuis l'ORSTOM Dakar), 1 compteur d'impulsions FRON, 1 compteur F4, 1 perche.
- 1 sonde électrique (pour mesure des niveaux piézométriques)
- 1 planimètre
- 1 étuve électrique (inefficace à VILA où le courant n'était distribué que trois heures par jour)
- 1 étuve à gaz, à partir de 1980, pour remplacer la précédente, transférée à Praia. Cette étuve devait être utilisée pour déshydratation des filtres ayant recueilli les transports en suspension.
- 1 enceinte de conservation des filtres déshydratés

- 1 balance de laboratoire de précision
- 1 ensemble filtration millipore
- 1 conductivimètre
- 1 pHmètre
- Divers équipements annexes tels que vaisselle de laboratoire (bêchers, pipettes, flacons de prélèvement, ...), outillage divers, tables et bureaux.

## 2.2.2. Les intervenants

Les travaux sur le terrain ont été réalisés sur la base d'une présence permanente d'hydrologues de juillet à octobre et de missions épisodiques en saison sèche (mesures hydrogéologiques, météorologiques et mise en place d'équipements).

Outre les missions initiales de M. ROCHE et en cours d'étude de J. COLOMBANI et J. Ch. FONTES, le projet a fait l'objet de différentes missions de J. LERIQUE de 1977 à 1979, puis de J.C. OLIVRY de 1980 à 1983, successivement, responsables des travaux. Ces missions leur ont permis, en dehors d'une participation directe au programme, d'orienter les mesures et travaux conduits sur le terrain :

- en 1978, par R. CALVEZ et R. GALLAIRE
- en 1979, par R. CALVEZ
- en 1980, par R. CALVEZ et R. HOORELBECKE
- en 1981, par R. HOORELBECKE et E. SERVAT
- en 1982, par E. SERVAT et R. HOORELBECKE
- en 1983, par Y. LE TROQUER

## 2.2.3. Difficultés rencontrées

Elles tiennent pour beaucoup aux conditions matérielles de travail liées pour l'essentiel à l'isolement de l'île et par suite aux difficultés de liaison, d'une part avec PRAIA et MINDELO, d'autre part avec DAKAR (base arrière des intervenants).

Les déplacements des personnels ont souvent posé problème ; les avions des lignes interinsulaires, toujours complets au niveau des réservations, étaient difficilement accessibles. La liaison avec Dakar (Air Sénégal et T.A.C.V.) était également très encombrée et l'absence de liaison maritime au moment des études entre le Sénégal et le Cap-Vert entraînait une saturation quasi-permanente des possibilités de fret aérien.

L'absence de vrai port à Tarrafal et à Préguiça n'a pas facilité l'acheminement du matériel (1). Ces difficultés expliquent sans doute les approvisionnements aléatoires de certaines marchandises. Au début des études, plusieurs produits étaient contingentés : carburants, gaz, matériaux de construction (ciment, fers) ....

---

(1) Un exemple des tribulations d'un hydrologue est donné ci-après, il porte sur l'acheminement d'une Land Rover acquise en avril 1981 et acheminée immédiatement à MINDELO (S. VICENTE) depuis le HAVRE (France), dont un transit par PRAIA était initialement prévu par les transporteurs (?)

Extraits du Rapport d'activités de R. HOORELBECKE

D'autres problèmes se sont posés au niveau des locaux (habitation, bureaux et magasins) fort difficiles à trouver. Les maisons sont le plus souvent occupées ; lorsqu'elles sont libres, elles sont ou abandonnées à la ruine ou réservées légitimement pour le retour de leurs propriétaires immigrants.

La résolution de ces problèmes, ou leur contournement, a exigé des dépenses d'énergie considérables de la part des hydrologues. Elle n'a souvent été possible que grâce au concours amical de nos collègues du M.D.R., du BURGEAP et de la Coopération Française, permanents dans l'île, et aussi à l'intervention de l'Administration de São Nicolau.

Sur le plan des personnels, les difficultés n'ont pas été négligeables. Les équipes formées

pour les mesures ont bien évidemment "tourné" avec les années et il n'a jamais été possible de disposer d'agents du M.D.R. suffisamment rodés par les mesures hydrologiques, faute d'une fréquence suffisante des événements hydropluviométriques pour être réellement efficaces le moment venu. On ne peut que souhaiter que cette efficacité soit apparue depuis la fin du projet avec les équipements remis ou laissés en place.

### 2.3. CONTENU PREVISIONNEL DES TRAVAUX

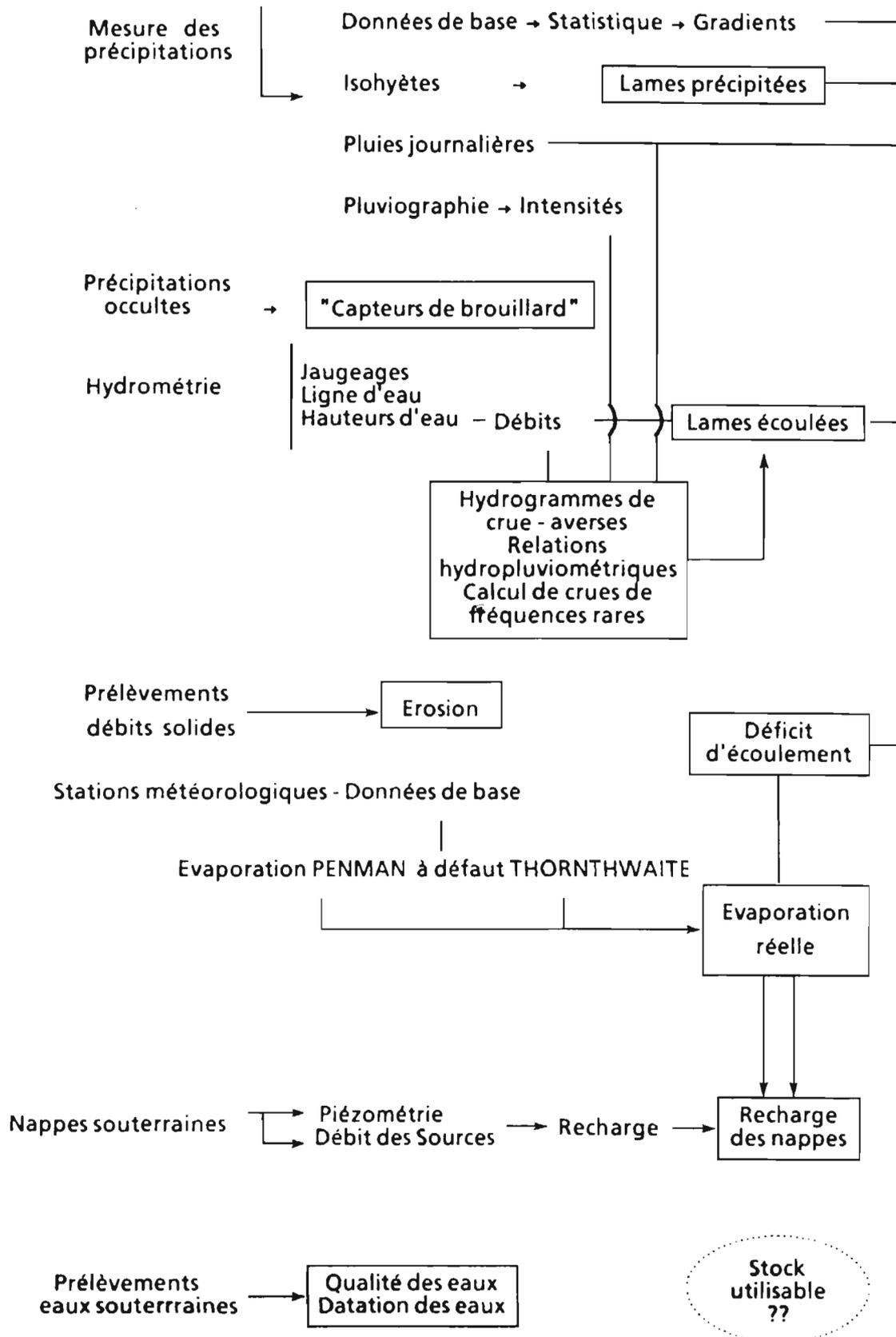
Sans rentrer dans le détail des protocoles de mesure qui seront développés à l'occasion, cas par cas, on peut résumer ci-après le contenu prévisionnel des mesures et observations projetées en fonction des objectifs précédemment définis.

---

*"Le 07.08.81 par téléphone à Sao Vicente (on apprend que) la Land Rover est en route pour PRAIA par le GREAT DANIELSEN ... le 08.08 arrivée du navire sans le véhicule ; le capitaine reconnaît l'erreur, fait une lettre pour la compagnie pour remboursement du transport mais pas de bateau en partance avant un mois ... le 13.08 tournée à Sao Vicente pour voir possibilités de dédouaner la Land Rover et de l'expédier à São Nicolau. Cruz LUNA, transitaire de la Coopération Française, annonce le 14/08 qu'il faudra 20 ours pour les formalités et l'immatriculation. Le 16.08 le Directeur de la Compagnie Maritime ARCA VERDE propose de faire venir, directement à Sao Nicolau le véhicule la semaine suivante. Le transitaire s'y oppose, la Land Rover ne pouvant débarquer qu'à Sao Vicente pour immatriculation. ... Le 17.09 le transitaire de Sao Vicente, contacté, indique qu'il n'y a toujours rien pour la Land Rover. Le 22.09 un importateur indique que*

---

*le VILMA actuellement à Sao Vicente pourrait transporter le véhicule à Sao Nicolau. Le 25.09 le transitaire indique que la possibilité du VILMA n'existe plus. Le 29.09 nouveau déplacement à Sao Vicente ; avec le transitaire, constatons sur la Land Rover en entrepôt absence rétroviseur, de deux rouescric, batterie ; le transitaire dégage sa responsabilité ; le 30.09 entrevue avec le délégué du Gouvernement de Sao Vicente qui contacte la Sécurité qui refuse un embarquement du véhicule sur un bateau "privé" de touristes. Le délégué téléphone aux agences de navigation ; l'une d'elles accepte de faire faire un détour à un de ses bateaux moyennant 25 000 Escudos. Le 02.10 l'agence téléphone pour que soit prévu à Tarrafal une plateforme de débarquement pour la Land Rover ... Le 03.10, fabrication de la plateforme ... Le 05.10 arrivée et débarquement de la Land Rover".*





Deux vues du débarquement délicat du premier véhicule (Toyota Land Cruiser) de l'étude en 1978 à Préguiça.  
(Photos R. CALVEZ).



## CHAPITRE V

DONNEES CLIMATOLOGIQUES  
ET PLUVIOMETRIQUES  
RECUEILLIES SUR LES BASSINS  
ETUDIES



## **DONNEES CLIMATOLOGIQUES ET PLUVIOMETRIQUES RECUEILLIES SUR LES BASSINS ETUDIES**

Les données présentées dans ce chapitre, en deux parties (météorologie et précipitations), ont pour principal objectif d'introduire deux paramètres du bilan hydrologique des bassins :

- l'évapotranspiration,
- la lame précipitée.

Elles introduisent, en outre, avec une description de la physionomie climatique des années d'études les rares événements hydropluviométriques qui seront décrits au chapitre suivant.

### **1 - DONNEES CLIMATOLOGIQUES DE FAJA ET ESTANCIA BRAZ**

Ces données sont d'une qualité très médiocre; elles permettent cependant d'apporter quelques éléments au fonctionnement climatologique du bassin de Ribeira Grande, et par suite aux bassins situés sur le versant au vent de l'île et en particulier du bassin de Ribeira brava.

#### **1.1. LES VENTS**

La station météorologique de FAJA occupe une situation assez exposée dans le bassin de

la Ribeira Grande sans être toutefois située dans un col, couloir canalisant les vents. La représentativité des mesures de vent se limite à la partie médiane du bassin.

Les vitesses des vents observées sont des vitesses moyennes journalières dont la moyenne est calculée mois par mois.

Dans les tableaux qui suivent on a indiqué les observations recueillies lors des études.

Ces valeurs moyennes n'apportent pas une réelle connaissance du régime des vents ; aucune valeur mensuelle ne dépasse 12 km/heure et la vitesse journalière maximale observée en décembre 1978 n'est que de 21 km/heure. Quelques relevés indiquent en juin 1979 des vitesses de l'ordre de 46 km/heure.

A l'aéroport de Campo de Preguiça, au-dessus de Vila, les vents sont généralement plus forts (installation d'un générateur Aérowatt pour l'exhaure des eaux d'un forage). Des mesures effectuées par la société AEROWATT et le BURGEAP ont montré sur un suivi de plus de 6 mois en période d'alizés des vitesses supérieures à 7m/s (25 km/heure) pendant plus de 10 heures par jour. La vitesse maximale qui y a été observée le 14 août 1980 est de 61 km/h (ou 17 m/s) la période de l'année semble indiquer qu'il s'agissait là d'un vent d'orage.

Vitesse moyennes (m/s)

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
1984		-	2.48	2.20	2.27	1.91	1.71	2.09	1.97	1.48	1.1.80	2.02
1985	2.54	2.49	2.01	2.46	1.99	1.63	1.88	1.91	1.90	1.51	2.0	2.45
1986	3.28	1.96	2.56	1.81	1.76	1.73	1.90	1.83	1.83	1.41	1.65	1.29

VITESSES DU VENT A FAJA

	1978				1979	
	Sept	Oct.	Nov	Déc.	Janv.	
Vitesse m/s moyenne	2.06	1.90	2.21	2.26	2.51	
Vitesse journalière maximale	3.35	4.51	5.78	5.82	5.17	1
Vitesse journalière minimale	1.14	1.35	0.93	0.68	1.46	

Tableau 5.1 : Mesure du vent à la station de Faja

## 1.2 LES TEMPERATURES

### 1.2.1. Les observations

Les observations de températures à Faja de Cima et Estancia Braz sont partiellement affectées par des lacunes (1978, 1979, 1983) et semblent parfois être entachées d'erreurs malgré les contrôles effectués sur les thermomètres utilisés. Aux fins de minimiser les erreurs au niveau des moyennes, nous avons introduit les données plus récentes recueillies à la station de FAJA par le MDR et la Coopération Française en 1984, 1985 et 1986 (informations communiquées par M. de MARCK).

Les tableaux 5.2 et 5.3 donnent les températures moyennes mensuelles et annuelles des minimums ( $T_n$ ) et des maximums ( $T_x$ ), ainsi que la température moyenne définie par la moyenne arith-

métique des températures minimum et maximum  $(T_n + T_x)/2$  et l'amplitude moyenne mensuelle (différences entre Tmax et Tmin), ainsi que l'amplitude moyenne annuelle calculée entre les mois de températures moyennes extrêmes.

Les figures 5.1 et 5.2 illustrent pour la période 1978-1983 les variations de température observées.

La figure 5,3 donne les variations comparées des températures moyennes mensuelles (maximum, minimum, moyenne) pour les stations de FAJA et ESTANCIA BRAZ sur la période de 1978 à 1984 et la moyenne 1978-1986 pour la seule station de FAJA.

Cette dernière courbe montre un léger décalage des valeurs vers le bas pour les plus faibles températures de novembre à avril. Ceci

T maxi mensuelle	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyennes annuelles
1978									23.9	24.6	24.0		
1979	21.0							25.2	27.1	24.4	22.5	21.9	
1980	20.9	21.2	20.6	23.5	21.1	23.2	23.6	23.9	24.5	25.4	24.0	21.8	22.8
1981	22.2	21.8	24.2	22.4	22.0	24.0	27.0	26.6	27.4	26.9	27.4	27.7	25.0
1982	28.0	28.0	18.5	18.3	19.5	20.1	20.0	22.3	21.7	21.5	21.0	19.2	21.5
1983	18.7	20.9						25.8	26.8	27.0	25.1	22.2	
1984	19.7	22.7	20.9	22.1	22.2	23.4	24.9	24.9	25.3	24.8	22.6	20.7	22.9
1985	20.1	21.1	20.7	21.5	21.2	24.2	24.5	25.6	26.6	27.2	25.2	21.6	23.3
1986	19.0	19.5	19.9	21.0	22.5	22.4	23.3	24.9	25.9	24.2	23.0	21.3	22.2
Moyenne	21.2	22.2	20.8	21.5	21.4	22.9	23.9	24.9	25.5	25.1	23.9	22.1	23.0
T min. mensuelle													
1978									22.1	20.8	19.5		
1979	16.8							19.3	19.8	20.1	18.0	16.6	
1980	18.8	19.2	18.8	17.3	18.0	18.4	18.9	19.9	20.6	19.7	17.7	16.5	18.7
1981	15.2	15.4	15.9	15.7	16.3	17.1	19.0	18.7	19.2	18.4	16.5	14.3	16.8
1982	16.0	16.2	16.3	16.5	17.7	18.2	17.9	20.8	20.6	20.2	19.5	17.9	18.2
1983	17.1	17.6						18.9	20.8	20.8	20.2	18.1	
1984	16.1	16.5	15.5	16.7	15.6	18.3	19.6	20.2	20.9	19.7	18.7	17.3	17.9
1985	16.0	16.0	16.0	16.3	16.8	19.1	20.2	21.0	21.6	21.1	19.9	18.2	18.5
1986	15.9	15.1	15.2	16.1	16.7	18.0	19.1	20.8	21.8	20.6	18.3	16.9	17.9
Moyenne	16.5	16.6	16.3	16.4	16.9	18.2	19.1	20.0	20.8	20.2	18.7	17.0	18.1
T moyenne mensuelle													
1978									23.0	22.4	21.3		
1979	18.8							22.3	22.6	22.8	20.3	19.3	
1980	19.9	20.2	19.7	20.4	19.6	20.8	21.3	21.9	22.6	22.6	20.9	19.2	20.7
1981	18.7	18.6	20.1	19.1	19.2	20.6	23.0	22.7	23.3	22.7	22.0	21.0	20.9
1982	22.0	22.1	17.4	17.4	18.6	19.2	19.0	21.6	21.2	20.9	20.3	18.6	19.9
1983	17.9	19.3	01.0					22.4	23.8	23.9	22.7	20.2	
1984	17.9	19.6	18.2	19.4	18.9	20.9	22.2	22.6	23.1	22.2	20.7	19.0	20.4
1985	18.0	18.6	18.4	18.9	19.0	21.6	22.4	23.3	24.1	24.2	22.6	19.9	20.9
1986	17.9	17.8	17.6	18.6	19.6	20.2	21.2	22.8	23.9	12.4	20.6	19.1	20.1
Moyenne	18.9	19.4	18.6	18.9	19.1	20.6	21.5	22.4	23.2	22.6	21.3	19.6	20.5
Amplitude moyenne journalière													annuelle
1978									1.8	3.8	4.5		
1979								5.9	7.3	4.3	4.5	5.3	
1980	2.1	2.0	1.8	6.2	3.1	4.8	4.7	4.0	3.9	5.7	6.3	5.3	3.8
1981	7.0	6.4	8.3	6.7	5.7	6.9	8.0	7.9	8.2	8.5	10.9	13.4	4.9
1982	12.0	11.8	2.2	1.8	1.8	1.9	2.1	1.5	1.1	1.3	1.5	1.3	3.5
1983	1.6	3.3						6.9	6.0	6.2	4.9	4.1	
1984	3.1	6.2	5.4	2.7	6.6	5.1	5.4	4.7	4.4	5.1	3.1	3.4	5.1
1985	4.1	5.1	4.7	4.8	4.4	5.1	4.3	4.6	5.0	6.1	5.3	3.4	6.2
1986	3.1	4.4	4.7	4.9	5.8	4.4	4.2	4.1	4.1	3.6	4.7	4.4	6.6
Moyenne	4.7	5.6	4.5	5.1	4.5	4.7	4.8	4.9	4.7	4.9	5.2	5.1	4.6

N.B. Les informations de 1984, 85 et 86 ont été fournies par Michel de MARCK, Responsable de la Coopération Française à Sao Nicolau.

Tableau 5.2.: Températures moyennes mensuelles et annuelles à Faja da Cima (390 m)

T max mensuelle	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyennes annuelles
1978									26.8	26.5	26.3		
1979	22.4							27.1	28.6	27.3	25.4	24.8	
1980	23.4	23.1	22.8	22.6	22.8	23.8	27.1	27.5	27.7	27.4	26.5	24.4	24.9
1981				24.4	23.4	25.4	25.1	27.0	27.6	27.4	26.5	25.2	(25.8)
1982	24.5	23.6	24.0	23.3	24.4	25.1	25.7	26.2	25.8	25.8	26.3	23.1	26.8
1983										27.3	26.3	24.0	
1984	22.0												
Moyennes mensuelles	23.1	23.3	23.4	23.4	23.5	24.8	26.0	26.9	27.3	27.0	26.2	24.3	24.9
T min mensuelle													
1978									24.3	22.3	22.4		
1979	19.2							21.2	24.3	23.9	22.4	21.4	
1980	22.2	22.0	21.6	20.1	21.4	22.4	22.7	23.4	23.6	23.3	21.4	19.6	22.0
1981				19.6	19.9	20.2	20.1	22.5	23.1	23.6	23.1	21.6	(21.5)
1982	22.3	22.2	22.5	22.2	21.3	21.9	22.4	23.3	22.7	23.6	23.7	20.9	22.4
1983										23.6	24.2	21.7	
1984	20.4												
Moyennes mensuelles	21.0	22.1	22.0	20.6	20.9	21.5	21.7	22.6	23.6	23.4	22.9	21.0	21.9
T moyenne mensuelle													
1978									25.6	25.5	24.4		
1979	21.0							24.2	26.5	25.6	23.9	23.1	
1980	22.8	22.6	22.2	21.4	22.1	23.1	24.9	25.5	25.7	25.4	24.0	22.0	23.5
1981				22.0	21.7	22.8	22.6	24.8	25.4	25.5	24.8	23.4	(23.7)
1982	23.4	22.9	23.3	22.8	22.9	23.5	24.1	24.8	24.3	24.7	25.0	22.0	23.6
1983										25.5	25.3	22.9	
1984	21.2												
Moyennes mensuelles	22.1	22.7	22.8	22.1	22.2	23.1	23.9	24.8	25.5	25.4	24.6	22.7	23.5
Amplitude moyenne journalière													annuelle
1978									2.5	4.2	3.9		
1979	3.2							5.9	4.3	3.4	3.0	3.4	(6.2)
1980	1.2	1.1	1.2	2.5	1.4	2.4	4.4	4.1	4.1	4.1	5.1	4.8	5.1
1981				4.8	3.5	5.2	5.0	4.5	4.5	3.8	3.4	3.6	
1982	2.2	1.4	1.5	1.1	3.1	3.2	3.3	2.9	3.1	2.2	2.6	2.2	3.2
1983										3.7	2.1	2.3	
1984	1.6												
Moyennes mensuelles	2.1	1.2	1.4	2.8	2.6	3.3	4.3	4.3	3.7	3.6	3.3	3.3	3.4

Tableau 5.3 : Les températures moyennes mensuelles observées sous abri à Estancia Braz (45 m)

FAJA DE CIMA

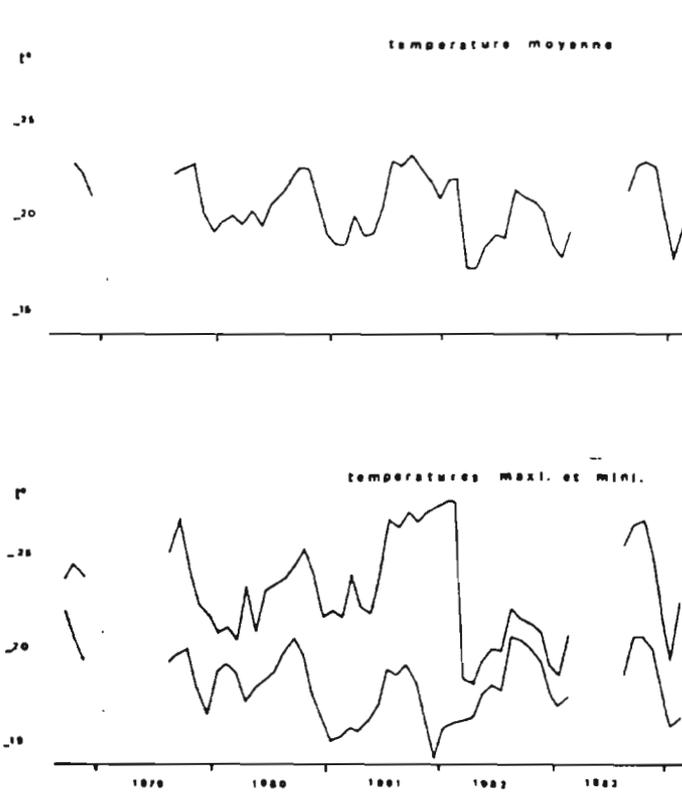


Fig. 5-1

ESTANCIA BRAZ

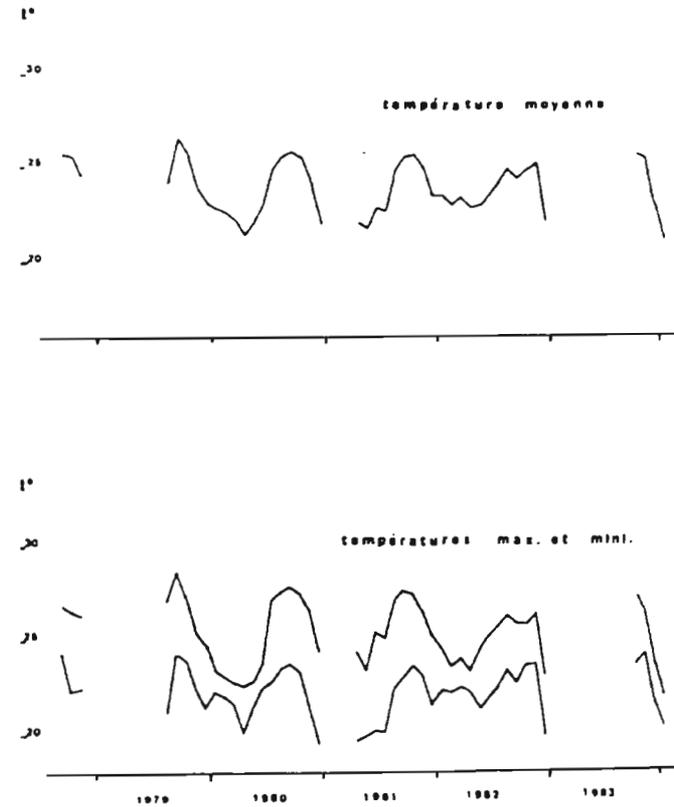
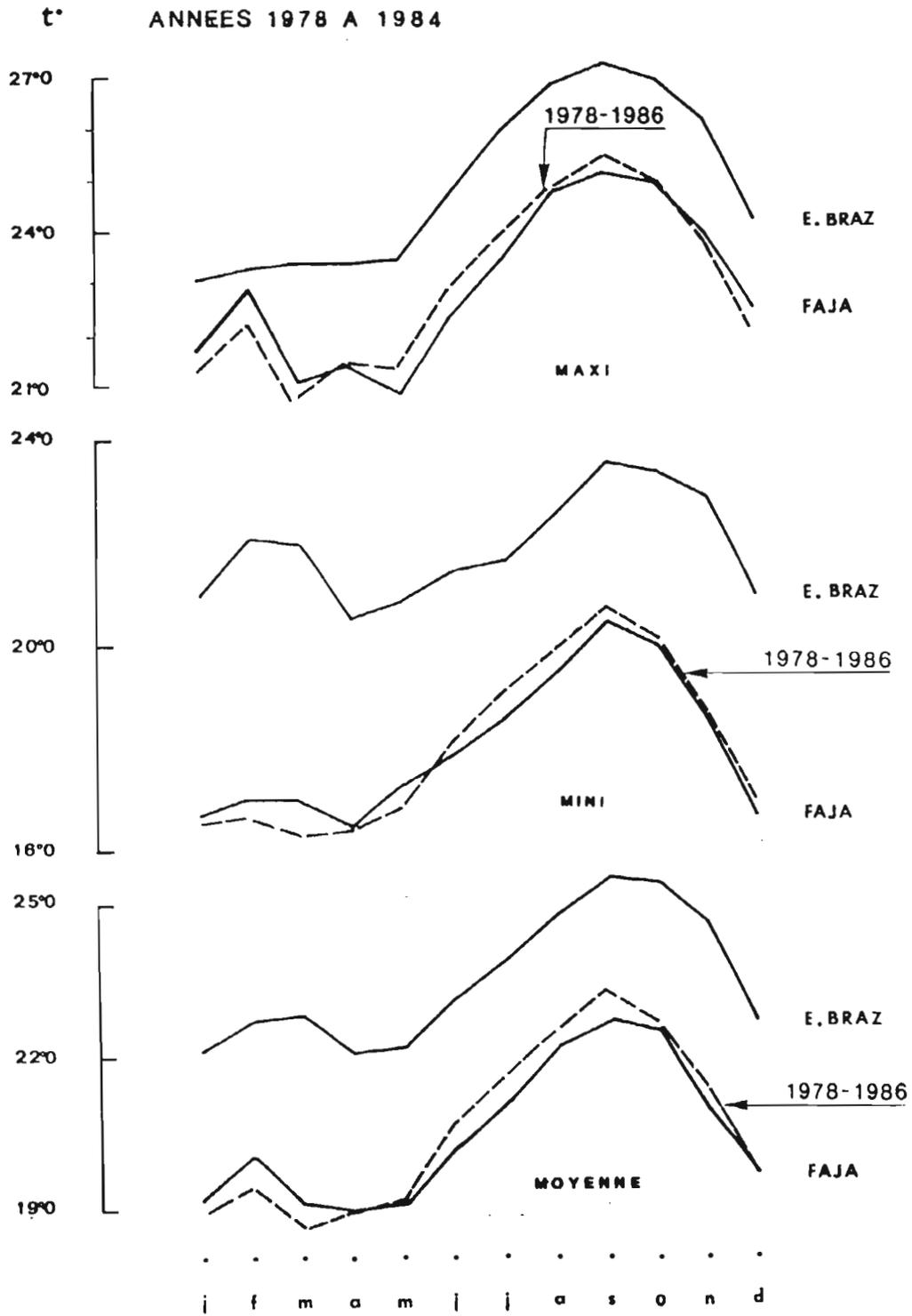


Fig. 5-2

Fig. 5-3 **TEMPERATURES MOYENNES**



revient à diminuer l'incidence parasite de ces mêmes mois de la saison sèche 1981-1982 où des problèmes de lecture paraissent évidents.

L'examen des courbes montre une saison chaude débutant en mai-juin et atteignant son maximum en août-septembre-octobre, septembre étant, aux deux stations, le mois le plus chaud.

Les températures chutent brutalement dès le mois de novembre, après la disparition des conditions climatiques de saison des pluies, pour atteindre les minimums de la saison froide s'étalant sur plusieurs mois, de janvier à avril, avec, semble-t-il, un certain côté aléatoire dans l'apparition de l'alizé frais maritime qui se maintient plus ou moins longtemps et agit en particulier sur les températures minimales. Un maximum secondaire assez net sur les minimums d'ESTANCIA BRAZ peut être interprété en février-mars comme l'influence de l'harmattan échauffé par son passage au-dessus de la Mauritanie.

L'amplitude annuelle moyenne, définie comme la différence des températures des mois les plus chauds et les plus froids est faible. Si elle a atteint 6,6°C à FAJA en 1986, elle est en moyenne de 4,6°C. A Estancia Braz, elle est plus faible encore avec une moyenne de 3,4°C.

L'amplitude journalière, définie comme la différence entre température maximale et température minimale est faible également et

varie peu à l'échelle des valeurs moyennes mensuelles. Les variations sont relativement peu significatives à FAJA où le maximum de février (5,6°C) précède le minimum de mars (4,5°C). A Estancia Braz, l'amplitude diurne serait minimale en février (1,2°C) et maximale en août (4,3°C), mais en tous cas inférieure à celle de FAJA plus éloignée de l'effet maritime.

On relèvera que les températures moyennes mensuelles de la saison sèche ne dépassent pas 28°C aux deux stations. La température moyenne maximale est de 25,5°C à FAJA et de 27,3°C à Estancia Braz (septembre). Les moyennes mensuelles des minimums tombent à 16,3°C en mars à FAJA avec des valeurs mensuelles toujours supérieures à 15°C (sauf en décembre 1981  $t = 14,3^\circ\text{C}$ ). A Estancia Braz, la moyenne mensuelle des minimums est de 20,6°C en mars et la valeur la plus basse n'est que de 19,2°C.

En températures journalières absolues, on a observé 31,9°C comme température maximale en octobre 1985 et 12,3°C en février 1985 à la station de FAJA.

Cette étude des températures, quoique imparfaite au niveau des observations, montre pour l'essentiel un climat largement tempéré par l'influence maritime. La température moyenne annuelle est de 20,5°C à FAJA et de 23,5°C à Estancia Braz ; le maximum moyen annuel est de 23°C à FAJA, 24,9°C à Estancia Braz ; le minimum moyen annuel est de 18°C à FAJA et de 21,9°C à Estancia Braz.

Les différences entre les deux stations tiennent pour l'essentiel à leur altitude et pour l'accessoire à la plus forte présence de la mer à Estancia Braz.

### 1.2.2. Gradient altimétrique.

Ce rôle de l'altitude nous a amené à rechercher à définir un gradient altimétrique des températures susceptible d'être utilisé dans notre étude.

La température varie généralement de façon linéaire avec l'altitude.

La température moyenne annuelle, sur la base des observations de Faja et Estancia Braz (1978-1984), varie suivant l'expression suivante :

$$t^{\circ}\text{C} = 24 - 0,009 z \quad z \text{ étant l'altitude exprimée en mètres.}$$

On perd 1°C pour 110 m de variation d'altitude. Le gradient varie assez peu dans l'année. On a les équations suivantes pour les mois extrêmes :

$$t_{\text{avril}}^{\circ}\text{C} = 23 - 0,0105 z$$

$$t_{\text{octobre}}^{\circ}\text{C} = 25,8 - 0,0086 z$$

La figure 5.4 montre ces différentes courbes de gradient altimétrique ainsi que celles qui ont été obtenues à Santiago à partir des observations de températures effectuées sur six postes de 1959 à 1968.

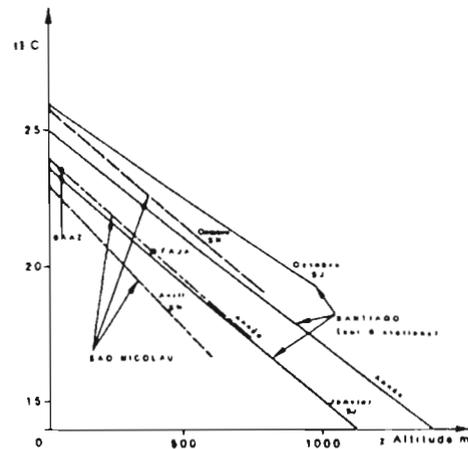
A Santiago (Babau et al., 1981), les équations sont assez peu différentes :

$$\text{- à l'échelle de l'année } t^{\circ}\text{C} = 25 - 0,008 z$$

$$\text{- pour le mois de janvier } t^{\circ}\text{C} = 23,6 - 0,009 z$$

$$\text{- pour le mois d'octobre } t^{\circ}\text{C} = 26 - 0,007 z$$

La position plus méridionale de Santiago explique que l'on gagne 1°C au niveau de la mer en température moyenne annuelle.



GRADIENT ALTIMÉTRIQUE DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE  
(Et gradients mensuels extrêmes)

SAO NICOLAU 11°C 24-0,009 z

SANTIAGO 11°C 25-0,008 z

Fig 5.4

### 1.3. L'HUMIDITE RELATIVE

Comme pour les températures de nombreuses lacunes ont affecté les observations de FAJA de CIMA et surtout d'Estancia Braz, notamment en 1979 et en 1983.

Les valeurs d'humidité relative (U) ont été calculées à partir des températures relevées trois fois par jour (thermomètres secs et humides) à 6 h, 12 h et 18 h.

Les tableaux 5.4 et 5.5 indiquent les résultats ainsi que les valeurs mensuelles de l'humidité moyenne.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyennes annuelles
Humidité à 6 H													à 9 H
1978									85.1	81.3	74.9		
1979								90.8	89.0	91.9	89.4	87.2	
1980	81.9	79.6	81.8	81.4	87.9	88.7	90.0	91.9	91.5	87.5	87.3	84.9	86.2
1981	78.3	77.8	77.9	81.9	86.9	86.1	90.2	87.8	88.0	89.8	85.6	80.5	84.2
1982	74.9	80.8	80.4	88.1	90.3	95.6	92.4			94.1	95.8	90.7	88.3
1983	86.3							96.3	93.9	87.4	93.3	93.7	
1984	96.8	71.6											
Moyennes mensuelles	83.6	77.4	80.0	83.8	88.3	90.1	90.9	91.7	90.6	90.1	90.3	87.4	87.0
Humidité à 12 H													
1978													
1979								77.4	80.7	82.3	82.7	74.1	
1980	73.2	72.1	74.8	70.5	73.5	75.0	76.7	84.4	81.3	82.7	82.0	83.6	77.5
1981	72.9	74.3	71.7	76.4	82.0	79.2	81.4		88.0	89.1	85.3	85.1	80.5
1982	72.0	74.8	72.7	84.2	74.2	81.9	89.5			89.0	88.1	87.2	81.4
1983	86.8							85.3	88.7	80.5	86.6	86.0	
1984	89.0	67.9											
Moyennes mensuelles	78.8	72.3	73.1	77.0	76.6	78.7	82.5	82.4	84.7	84.7	84.9	83.2	79.9
Humidité à 18 H													
1978													
1979													
1980	81.1	82.7	78.2	82.7	88.7	84.8	85.7	87.6	83.5	88.3	86.1	79.2	
1981	79.9	77.1	75.1	80.3	84.1	83.5	87.7	86.9	88.9	88.4	87.6	90.6	85.8
1982	81.0	81.5	81.3	88.7	86.2	88.7	86.7			89.3	91.9	94.3	84.2
1983	83.7							91.7	94.5	92.5	94.2	94.3	87.0
1984	93.9	80.0											
Moyennes mensuelles	83.9	78.8	78.2	83.9	86.3	85.7	86.7	89.6	88.7	89.1	87.2	88.5	85.5
Humidité moyenne													
1978													
1979													
1980	78.7	78.1	78.3	78.2	83.4	82.8	84.1	85.3	84.4	87.5	86.1	80.2	
1981	77.0	76.4	74.9	79.5	84.3	82.9	86.5	87.4	88.3	89.1	86.2	84.1	83.1
1982	76.0	79.0	78.1	87.0	83.6	88.7	89.5		87.4	88.3	86.2	85.4	70.3
1983	85.6							91.1		90.8	91.9	90.7	86.1
1984	93.2	73.2								86.8	91.4	91.3	
Moyennes mensuelles	82.1	76.7	77.1	81.6	83.8	84.8	86.7	88.3	88.4	88.2	88.2	86.3	84.1

Tableau 5.4 : Humidité relative à la station de FAJA de CIMA (390 m) (%)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyennes annuelles
<b>T max mensuelle</b>													
1978									78.3*	75.5*	70.2*		* à 9 h
1979								87.7	88.5	82.8	78.1	74.5	
1980	75.7	79.5	80.2	82.7	83.7	82.4	85.8	93.1	89.2	88.5	85.4	82.4	84.1
1981				93.2	89.3	90.9	90.1	93.5	99.3	98.4	93.7	95.8	93.8
1982	92.3	87.6	93.8	95.8	96.4	98.4	98.9						
1983		86.4								78.0	81.0	85.2	
1984	89.7												
<b>Moyennes mensuelles</b>	85.9	84.5	87.0	90.6	89.8	90.6	91.6	91.4	92.3	86.9	84.6	84.5	88.3
<b>T min mensuelle</b>													
1978													
1979				75.3		76.2		89.2	76.2	79.7	72.2	71.9	
1980	67.8	74.2	73.6	91.9	76.1	90.0	77.9	86.9	84.0	81.6	81.1	81.7	78.0
1981				89.2	83.9	96.5	93.5	89.9	98.5	94.5	95.5	94.3	92.4
1982	89.4	83.4	88.3		93.2		90.2						
1983		83.7								74.0	76.5	82.3	
1984	87.7												
<b>Moyennes mensuelles</b>	81.6	80.4	80.9	85.5	84.4	87.6	87.2	88.7	86.2	82.5	81.3	82.5	84.1
<b>T moyenne mensuelle</b>													
1978									80.7	78.6	71.4		
1979													
1980	74.5	78.6	79.1	79.8	80.2	81.1	84.0	84.9	83.1	80.7	77.2	72.3	
1981				90.6	85.1	94.4	88.2	92.1	90.4	84.2	82.0	79.9	82.2
1982	91.6	86.4	89.3	94.1	94.2	97.6	92.9	91.5	99.1	98.4	96.2	83.0	91.2
1983		87.7											
1984	87.3									76.6	81.0	84.2	
<b>Moyennes mensuelles</b>	84.5	84.2	84.2	88.2	86.5	91.0	88.4	89.5	88.3	83.7	81.6	79.9	85.8
<b>moyenne</b>													
1978													
1979													
1980	71.8	76.9	76.9	79.0	79.9	79.3	81.9	87.3	82.6	81.1	75.8	72.9	
1981				82.6	86.6	90.5	91.8	91.7	98.9	96.5	94.6	95.1	81.1
1982	92.0	87.0	91.6	95.0	95.3	98.0	95.9						92.0
1983		87.1								76.0	78.8	83.8	
1984	88.7												
<b>Moyennes mensuelles</b>	84.2	83.7	84.2	85.5	87.3	89.3	89.9	89.7	89.4	84.7	83.1	83.5	86.2

Tableau 5.5 : Humidité relative à Estancia Braz (45 m) (%)

A l'échelle de l'année, on relève que l'humidité moyenne passe de 87 % à 6 h, à 79,9 % à 12 h et à 85,5 % à 18 h, soit une valeur moyenne pour FAJA de 84,1 % sur la période observée.

A Estancia Braz, l'humidité moyenne passe de 88,3 % à 6 h, à 84,1 % à 12 h et à 85,8 % à 18 h soit une valeur moyenne de 86,2 %

La mesure de 6 h est probablement très proche du maximum d'humidité, tandis que celle de 12 h doit rester supérieure au minimum journalier qui doit se produire entre 14 et 15 h.

L'examen de ces chiffres montre des humidités très élevées pour l'aridité de l'île.

Celle-ci ne descend pas en valeur moyenne mensuelle en-dessous de 70 %. L'influence de l'air marin explique ces fortes valeurs et que la station d'Estancia Braz, plus directement exposée à l'océan, ait les valeurs les plus élevées, proches de 100 % certains jours, et des amplitudes journalières plus faibles qu'à Faja de Cima.

L'influence humidificatrice et régulatrice de la mer se retrouve également dans la différence d'amplitude annuelle des humidités mensuelles de Faja et Estancia Braz. L'amplitude des variations mensuelles d'humidité est de 6,8 % à Estancia Braz (89,9 % en juillet et 83,1 % en novembre) contre 11,7 % à FAJA (88,4 % en septembre et 76,7 % en février).

Les figures 5.5 et 5.6 donnent les variations de l'humidité moyenne sur la période d'observation.

FIG 5-5 FAJA DE CIMA

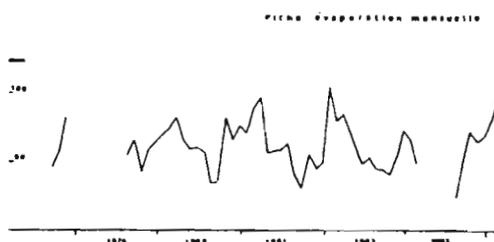
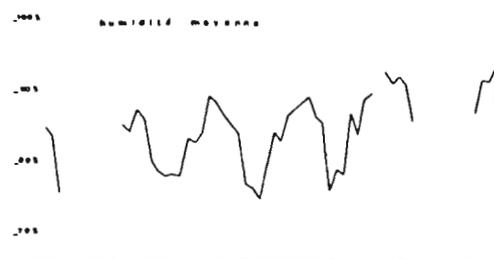
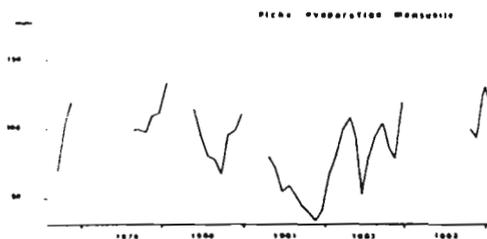
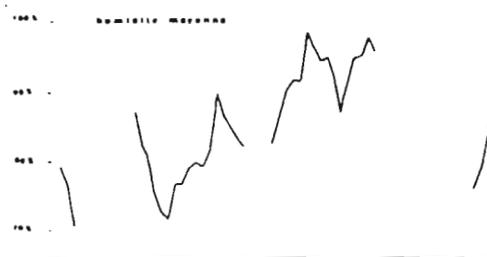


FIG 5-6 ESTANCIA BRAZ



La figure 5.7 compare la variation moyenne annuelle de FAJA à celle de E. BRAZ. Il est intéressant de relever le "plateau sommital" de fortes humidités du mois d'août à novembre pour FAJA avec un "creux" très marqué en février et mars. A Estancia Braz, le "plateau sommital" est plus précoce et va de juin à septembre ; le minimum absolu serait en novembre et un large "creux" subsisterait jusqu'en mars. La quasi-coïncidence du minimum de novembre d'Estancia Braz avec une des valeurs les plus fortes de FAJA conduit à émettre quelques réserves sur les mesures effectuées à Estancia Braz.

En dehors des valeurs extrêmes, on relève une augmentation assez régulière de l'humidité de mars à juin ou août, augmentation due d'abord à l'alizé marin du NNE puis aux prémisses de la saison des pluies. Le minimum ts

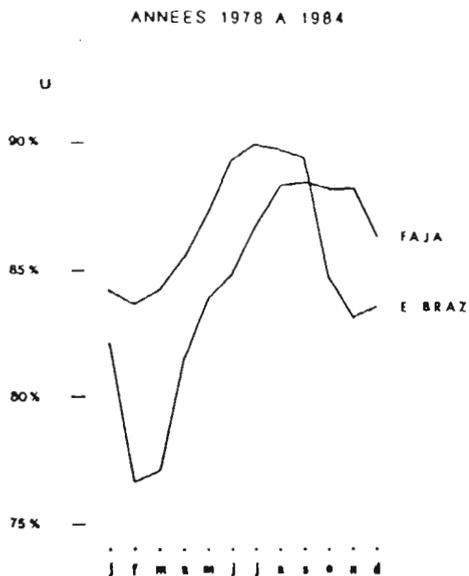
qui suit la chute brutale d'humidité, postérieure à la saison des pluies, pourrait correspondre en février à l'alizé continental ou harmattan d'ENE qui n'a pu s'humidifier par son bref passage au-dessus de l'océan.

## 1.4. L'EVAPORATION

### 1.4.1. Evaporation PICHE

Elle a été mesurée aux deux stations d'Estancia Braz et de Faja da Cima de 1978 à 1984 avec des lacunes d'observations assez importantes. A FAJA, les mesures se poursuivent et l'échantillon disponible se complète de trois années (1984 à 1986) dont les observations nous ont été communiquées par M. de MARCK. Les tableaux 5.6 et 5.7 résument l'information mensuelle tandis que la variation de l'évaporation PICHE mensuelle est

Fig. 5-7 HUMIDITE RELATIVE MOYENNE



EVAPORATION PICHE MOYENNE



donnée sur la période 1978-1984 dans les figures 5.5 et 5.6.

La figure 5.7 en traitant des moyennes permet d'identifier des variations saisonnières marquées à FAJA par un net minimum d'évaporation situé en août (forme voisine des

Année Mois	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	Moyenne
Janvier			68.9	70.0	103.9	65.8	78.4	40.0	86.8	73.4
Février			73.6	88.2	78.6	47.0	95.8	63.8	55.4	71.8
Mars			80.9	96.1	83.7		62.9	45.9	67.9	72.9
Avril			64.5	55.5	72.0		70.2	60.3	44.1	61.1
Mai			58.0	57.4	58.9		51.5	46.5	53.0	54.2
Juin			59.3	58.2	48.0		43.8	77.1	47.4	55.6
Juillet			56.0	62.6	52.7		42.2	48.7	47.4	51.6
Août		53.9	33.9	40.4	44.9	23.9	37.2	57.7	48.0	42.5
Septembre	45.5	64.5	34.5	29.4	43.5	51.6	39.9	55.2	35.7	44.4
Octobre	56.7	40.9	81.5	54.8	40.0	71.3	39.7	101.7	41.5	58.7
Novembre	81.7	58.2	64.8	45.0	53.7	64.2	39.9	108.9	58.5	63.9
Décembre		63.2	75.3	48.7	72.5	68.5	30.4	87.1	49.0	61.8
Total année	-	-	751.2	706.3	752.4	-	631.9	792.9	634.7	711.9

Tableau 5.6.: Evaporation mensuelle et annuelle mesurée sur PICHE en mm à la station de FAJA de CIMA (390 m)

Année Mois	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	Moyenne
Janvier			134.5		67.5		118.5	106.8
Février					79.4			(80)
Mars					99.5			(100)
Avril				80.1	108.3			94.2
Mai			114.1	71.3	92.3			92.6
Juin			95.1	54.0	51.4			66.1
Juillet			80.6	58.9	79.9			73.1
Août		98.9	77.5	51.2	94.9			80.1
Septembre	69.3	99.9	66.0	43.4	104.3			76.6
Octobre	102.5	97.7	96.1	39.1	86.7	100.3		87.1
Novembre	120.6	110.7	99.0	32.9	78.7	93.9		89.3
Décembre		112.2	111.6	41.1	120.0	132.1		103.4
Total année					1062.9	-	631.9	1049.3

Tableau 5.7.: Evaporation mensuelle et annuelle mesurée sur PICHE en mm à la station de ESTANCIA BRAZ (390 m)

courbes 1978-1983 et 1978-1986) et une période maximale de janvier à mars. A Estancia Braz, les résultats doivent être pris avec réserves notamment pour le creux de février ; le maximum se situerait en décembre et janvier ; le minimum, décalé en juin, s'il se confirmait, pourrait correspondre à une renverse des températures de la mer avec, pour corollaire de l'échauffement océanique, une évaporation marine d'ailleurs traduite par les maximums d'humidité.

Dans le détail, on relève une grande variabilité de l'évaporation PICHE journalière.

A FAJA, c'est en mars qu'on a observé les valeurs journalières maximales de 12,4 et 10,5 mm en 1980 et 1981 ; mais pour ce même mois le minimum peut tomber à 0,2 mm. L'évaporation PICHE maximale ne dépasse pas 2,7 mm en septembre. Les moyennes journalières mensuelles sont pour la plus forte, observée en janvier 1982 ( $3,1 \text{ mm.j}^{-1}$ ), pour la plus faible observée en septembre 1981 ( $0,9 \text{ mm.j}^{-1}$ ). Un autre maximum s'observe en novembre 1985 avec  $3,6 \text{ mm.j}^{-1}$ .

A Estancia Braz, les variations sont moins marquées ; le maximum est observé en décembre 1980 avec  $6,5 \text{ mm.j}^{-1}$  ; le minimum journalier est observé en janvier 1982 ( $0,6 \text{ mm.j}^{-1}$ ) et d'août à décembre 1981 :  $0,7$  à  $0,4 \text{ mm.j}^{-1}$ . La moyenne journalière mensuelle la plus forte est de  $3,6 \text{ mm.j}^{-1}$  pour décembre 1980 et avril 1982 ; la valeur moyenne journalière mensuelle la plus faible est de  $1 \text{ mm.j}^{-1}$  en novembre 1981.

Avec des variations annuelles du total d'évaporation PICHE de 630 à 790 mm et une moyenne annuelle de 712 mm pour FAJA (390 m) et une moyenne annuelle de l'ordre de 1050 mm pour Estancia Braz (45 m), l'évaporation est particulièrement faible pour ce type de climat aride et ces latitudes ... Mais le milieu marin explique tout ... et en particulier que l'on ait des évaporations PICHE de trois à quatre fois inférieures à ce que l'on relève en milieu continental africain (Mali, Tchad) où subsiste partout le même schéma de variations saisonnières.

Bien qu'aucune corrélation stable n'ait pu être faite entre l'évaporation PICHE et d'autres mesures d'évaporation, on considère que l'évaporation PICHE constitue une donnée météorologique valable au plan de la comparaison entre stations climatiques ; elle ne peut cependant pas être utilisée dans des approches de bilans.

#### 1.4.2. Evaporation sur bac

Ces mesures sur bac, effectuées à FAJA, constituent un des échecs les plus manifestes des observations météorologiques -dont nous avons déjà souligné certains aspects ; il n'a jamais été possible d'avoir un suivi sérieux de ces mesures par les différents observateurs ; le ravitaillement en eau a toujours posé problème et aucune solution satisfaisante n'a permis d'utiliser les quelques bribes d'observations, en dehors des mesures initialement réalisées en 1978-1979. Ces mesures sont rappelées ci-après :

Tableau 5.8 : Mesures de l'évaporation sur bacs à la station de Faja

	1978			1979		
	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan...	...juin
<b>Bac classe A</b>						
Et mm	(105)	86.1	99.4	77	89.9	(110)
Ej mm/j	3.5	2.78	3.30	2.48	2.90	3.67
Ex mm/j	5.6	5.3	4.9	4.0	4.9	6.0
En mm/j	0.7	1.1	1.0	0.4	1.3	3.0
<b>Bac Colorado</b>						
Et mm	(112)	77.2	96	72.6	89.2	(126)
Ej mm/j	3.6	2.49	3.20	2.34	2.88	4.2
Ex mm/j	5.5	4.51	5.0	3.0	4.0	5.7
En mm/j	1.1	1.1	2.0	1.0	2.0	0.4

$E_t$  : hauteur mensuelle d'évaporation  
 $E_j$  : Valeur journalière moyenne de l'évaporation  
 $E_x$  : Valeur journalière maximale de l'évaporation  
 $E_n$  : Valeur journalière minimale de l'évaporation

Une assez bonne corrélation existe entre les observations des deux bacs ; les données du bac de classe "A" sont obtenues à partir du bac enterré Colorado type ORSTOM par l'équation suivante :

$$E_A = 0,713 E_C + 0,702$$

$E_A$  et  $E_C$  étant l'évaporation journalière des bacs (en mm) de classe A et Colorado.

#### 1.4.3. Formules de calcul de l'évapotranspiration

Un certain nombre de formules empiriques permettent une approche plus ou moins précise du volume de l'évapotranspiration mensuelle et annuelle. Ces formules néces-

sitent l'introduction de divers paramètres dont les plus courants sont la température, la vitesse des vents, le rayonnement net, l'insolation, la tension de vapeur, ...

Un certain nombre de données aurait pu être obtenu par un fonctionnement optimal de la station météorologique ; seule la température peut être utilisée ici.

La formule la plus simple basée sur la température est celle de THORNTHWAITE. Elle permet de calculer l'Evapotranspiration potentielle mensuelle :

$$e_m = 16 \left( 10 \frac{t}{j} \right)^a$$

t est la température moyenne mensuelle  
I est un indice annuel somme des douze indices mensuels i calculés d'après la température t par l'expression

$$i = 0,09 t^{1.5}$$

a est donné par l'expression

$$a = \frac{1,6}{100} I + 0,5$$

Les résultats sont les suivants :

Tableau 5.9 : EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE D'APRES THORNTHWAITE

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	ANNEE	
FAJA	i	2.27	2.41	2.25	2.24	2.25	2.45	2.62	2.82	2.92	2.88	2.58	2.36	30.1
	t°C	19.2	20.0	19.1	19.0	19.1	20.2	21.1	22.2	22.7	22.5	20.9	19.7	20.5
	e mm	98.7	102.7	98.2	97.7	98.2	103.7	108.2	113.7	116.3	115.3	107.2	101.2	1170
E. BRAZ	i	2.81	2.92	2.94	2.81	2.82	3.0	3.15	3.33	3.48	3.46	3.29	2.92	36.9
	t°C	22.1	22.7	22.8	22.1	22.2	23.1	23.9	24.8	25.5	25.4	24.6	22.7	23.5
	e mm	112.2	115.6	116.1	112.2	112.7	117.8	122.2	124.3	131.1	130.6	126.1	115.6	1335

Les températures les plus élevées se situant en été la formule aboutit au calcul des plus fortes évapotranspirations potentielles pendant cette saison. Ceci ne correspond évidemment pas à la réalité observée où les mois les plus humides ne peuvent exprimer un plus fort pouvoir évaporatoire.

Si cela était nécessaire, cela montrerait les limites de validité de formules dont les calages plus ou moins sophistiqués ne tiennent pas toujours compte des conditions extrêmes d'un milieu climatique particulier.

Un autre exemple est donné par la formule de TURC donnant l'évapotranspiration réelle annuelle par  $E_R = P / (0,9 + P^2 / L^2)^{1/2}$  avec  $L = 300 + 25 t + 0,05 t^3$ , qui aboutit à  $E_R = 372$  mm à FAJA et  $E_R = 290$  mm à E. BRAZ, valeurs à la limite de la crédibilité puisqu'elle excèdent le total pluviométrique annuel.

Dans l'île de Santiago, les observations permettent de comparer les résultats obtenus par la formule de THORNTHWAITE avec ceux donnés par la formule de PENMAN qui fait intervenir le bilan énergétique (et de nombreux paramètres climatiques). Les résultats obtenus par L.M. ALVES (op. cit.) sont donnés ci-après (en mm) :

Tableau 5.10

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
PENMAN	88.2	78.3	115.6	123.5	132.5	137.5	108.9	117.6	103.6	119.1	89.7	81.2	1295.7
THORNTHWAITE	61.2	56.0	84.4	85.2	99.7	114.4	114.8	120.5	109.1	101.3	72.4	65.3	1084.3

La formule de PENMAN paraît redonner aux mois humides un poids plus modeste de l'ETP que celle de THORNTHWAITE. Elle paraît cependant nettement sous estimer les mois de saison sèche de novembre à mars, pour autant que la mesure par évaporomètre PICHE donne une appréciation valable du sens des variations.

La formule de THORNTHWAITE donne des résultats légèrement supérieurs en juillet, août, septembre à ceux de PENMAN. On y a vu (Babau *et al.*, 1981) l'incidence du paramètre "vents" qui a atteint à cette époque sa valeur minimum.

#### 1.4.4. Conclusions

L'analyse qui a été faite permet de valider les déterminations de l'évapotranspiration potentielle qui ont été faites par la formule de THORNTHWAITE au moins pour les mois de la saison humide. Ce sont ceux-là qui comptent dans le bilan hydrologique avec les mois immédiatement consécutifs (octobre, novembre, décembre). Pour ces mois, en s'inspirant des variations de l'Evaporation PICHE, on peut identifier l'ETP d'octobre au minimum égale à celle de juillet et celle des deux mois suivant à + 10 et + 15 %.

On pourra donc considérer dans le bilan hydrologique que l'évapotranspiration potentielle correspond aux valeurs moyennes suivantes :

Tableau 5.11

	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
FAJA (390m) en mm j <sup>-1</sup>	108 3.5	114 3.7	116 3.9	115 3.7	125 4.2	130 4.2
E. BRAZA (45 m) en mm j <sup>-1</sup>	122 3.9	127 4.1	131 4.4	130 4.3	143 4.8	150 4.8

En s'en tenant à un gradient linéaire on aurait pour les altitudes moyennes des deux

bassins les valeurs suivantes de l'ETP :

Tableau 5.12

	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
R. BRAVA (350 m) en mm j <sup>-1</sup>	3.55	3.75	3.95	3.75	4.25	4.25
R. GRANDE (45 m) en mm j <sup>-1</sup>	3.30	3.45	3.6	3.30	3.85	3.85

Pour les autres mois de l'année, un complément de mesures devrait permettre de préciser la demande en évapotranspiration

potentielle pour les problèmes de bilans sur parcelles irriguées.

## 2. PRECIPITATIONS OBSERVEES SUR LES BASSINS DE LA R. GRANDE ET DE LA R. BRAVA DE 1978 A 1983.

### 2.1. LES OBSERVATIONS

Le réseau pluviométrique précédemment décrit a permis de recueillir les informations présentées dans les tableaux 5.11 à 5.16 qui donnent pour chaque année d'étude les hauteurs journalières de précipitations. Ces tableaux complètent l'information mensuelle donnée au chapitre III dans l'étude globale des précipitations à São Nicolau.

L'examen de ces relevés montre l'extrême variabilité spatiale des averse journalières

d'un point du bassin à un autre ; de toute évidence le relief est responsable des très nombreuses hétérogénéités dans la répartition des averse. Il est fréquent qu'un poste pluviométrique ne reçoive aucune précipitation quand celles-ci peuvent atteindre et dépasser 10 mm sur un poste voisin. Il est aussi fréquent de voir de "grosses" averse limiter leur extension à un seul des deux bassins ou déborder à peine sur l'autre par le col de Cachaço.

Tableau 5.13. PLUVIOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS DE L'ILE DE SAO NICOLAU

1978	RIBEIRA BRAVA								RIBEIRA GRANDE						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
<b>Août</b>															
3	12.7	1	1.5									9.8	16.7	11.8	8.3
4				14.9		29.1	4.6		10.0	13.8		6.3	9.6	0.7	3.0
25-26-27			12.2	29.7		75.3	15.7	45.2	38.0	72.4	52.2	44.1	44.1	17.9	13.5
<b>TOTAL</b>	12.7		13.7	44.6		104.4	20.3	45.2	48.0	86.2	52.2	60.2	70.4	30.4	24.8
<b>Septembre</b>															
1	0.3											3.0			1.2
2				1.5		2.2		3.2	3.0	8.0	5.3	0.3	10.8	1.5	1.1
6	0.2		1.0	0.5		0.8		0.7	2.0	4.2	2.6	3.4	2.7	1.0	0.6
15	1.5		9.0	15.9		16.6		21.8	23.3		19.6	12.0	18.0	5.4	0.8
16	3.6		7.0						8.9	26.9	12.3	16.2	10.3	1.7	0.5
20	1.3		0	1.7		4.3		2.2	6.0	4.5	3.5	6.8	3.2	0.6	4.1
25						5.2		10.4	3.3			2.4			
26	63.4		74.5	185.3		110.3		293.5	150.0			23.9			14.4
27	28.7		42.0	93.6					37.6						
28	21.0		14.0	41.9		80.9		130.1	21.3	179.3	160.0	119.6	101.5	75.0	31.1
<b>TOTAL</b>	120.0		147.5	340.4		220.3		461.9	255.4	222.9	203.3	187.6	146.5	85.2	53.8
<b>Octobre</b>															
13											21.9	21.9			11.5
14	6.5	8.0	7.1	11.2		16.5		16.0	44.8	67.4	14.8	6.0	25.5	6.5	
20	1.0	1.5	1.0						0.3		0.1	1.0	0.1		0.1
21	4.0	4.0		1.0		2.6	1.1				1.6	0.5	0.6	3.1	
22	0.7	1.0													
23										2.4	0.6	0.4	5.6	3.2	2.1
<b>TOTAL</b>	12.2	14.5	8.1	12.2		19.1	1.1	16.0	45.1	69.8	39.0	29.8	31.8	12.8	13.7
<b>TOTAL ANNEE</b>	144.9	14.5	169.3	397.2		343.8	21.4	523.1	348.5	378.9	294.5	277.6	248.7	128.4	92.3

Tableau 5.14 : PLUVIOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS DE L'ILE DE SAO NICOLAU

1979	RIBEIRA BRAVA								RIBEIRA GRANDE						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
Juillet															
20-21	48.5	56.5	50.0	88.5		90.0	98.3	96.0	100.0	95.0	126.1	92.6	101.6	35.6	30.0
TOTAL	48.5	56.5	50.0	88.5		90.0	98.3	96.0	100.0	95.0	126.1	92.6	101.6	35.6	
Août															
10				0.4		0.5		0.3				7.2	3.5	1.1	
11	1.5	1.3		0.5		1.5	1.9	0.5	1.5	3.0	6.1	0.6		2.3	0.6
27	3.0	4.3		5.4		5.7	4.3	5.1	9.0	7.0	14.0	7.5	10.0	1.5	3.1
TOTAL	4.5	5.6		6.3		7.7	6.2	5.9	10.5	10.0	20.1	15.3	13.5	4.9	3.7
Septembre															
1	0.2	0.1										3.0	2.8		0.3
5	14.0	14.2	12.3	20.7		10.5	18.5	11.8	15.0	20.0	16.8	10.3	12.4	8.4	6.5
9									1.4	1.1	1.6	0.5	0.7		
TOTAL	14.2	14.3	12.3	20.7		10.5	18.5	11.8	16.4	21.1	18.4	13.8	15.9	8.4	6.8
Octobre															
20				27.5		40.0		28.5					6.5		
21	30.0	37.0	35.0	29.0		32.0	55.7	40.0	90.7	67.4	72.0	93.7	96.0	57.1	46.9
22	18.0	22.0	25.0				28.9		56.4	76.5	54.0	42.7		35.0	23.5
23			20.0	32.0		42.0	9.8	36.0	11.4	12.2	12.0		9.9	17.2	11.8
TOTAL	48.0	59.0	80.0	88.5		114.0	93.9	104.5	158.5	156.1	138.0	136.4	112.4	104.3	82.2
Décembre															
22	8.8	12.3		16.5		52.5	13.0	32.5	11.6	5.0	3.0	3.0	3.5	0.5	2.0
TOTAL	8.8	12.3		16.5		52.5	13.0	32.5	11.6	5.0	3.0	3.0	3.5	0.5	2.0
TOTAL ANNEE	124.0	147.7	142.3	220.5		274.7	229.9	250.7	297.0	287.2	305.6	261.1	746.9	153.7	124.7

Tableau 5.15 : PLUVIOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS DE L'ILE DE SAO NICOLAU

1980	RIBEIRA BRAVA								RIBEIRA GRANDE						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
Février															
27	6.0	5.6		7.0		8.5	7.8	8.0	4.0	6.5	8.0			4.6	2.5
28	4.5	4.8	5.0	1.0		0.5		0.5							2.7
TOTAL	10.5	10.4	5.0	8.0		9.0	7.8	8.3	4.0	6.5	8.0			4.6	5.2
Juillet															
29	15.5	14.7		14.8		16.5	17.0	16.8	10.9		10.22	15.0		14.2	10.41
30	17.3	19.2	17.0	17.8		19.5	22.0	19.8	20.5	32.6	20.8	28.3	29.0	20.8	3.8
TOTAL	32.8	33.9	17.0	32.6		36.0	39.0	36.6	31.4	32.6	31.0	43.3	29.0	35.0	24.2
Août															
14	37.8	30.4	40.0	30.5		31.8	61.7	30.0	80.4	76.6	54.5	56.5	48.0	35.9	27.5
18	2.4	4.0	12.0	4.0		22.0	18.2	19.0	11.0	13.5	19.5	18.5	18.4	10.7	17.2
19	5.0	6.0		3.5		9.0	7.2	5.0	7.2		7.5	9.0	10.2	1.8	0.1
23	22.0	26.5	14.5	29.0		36.4	34.5	35.8	64.0	54.4	29.7	23.6	23.3	9.0	11.9
30	0.1	0.2		0.2		0.1	7.0		1.9	2.3	1.5	2.3	1.5	3.2	2.3
TOTAL	67.3	67.1	66.5	67.2		99.3	128.6	89.8	164.5	146.8	112.7	109.9	101.4	60.6	59.0
Septembre															
5	16.0	14.0	15.0	14.5		16.0	21.0	16.5	20.5		17.7	16.0	15.3	14.0	12.4
9	36.5	48.5	23.0	44.0		78.5	85.5	90.4	208.9	218.2	175.5	116.5	114.3	40.6	8.3
TOTAL	52.5	62.5	38.0	58.5		84.5	106.5	106.9	228.4	218.2	193.2	132.5	129.6	54.6	20.7
TOTAL ANNEE	163.1	173.9	126.5	166.3		228.8	281.9	241.6	428.3	404.1	344.9	285.7	260.0	154.8	109.1

Tableau 5.16 : PLUVIOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS DE L'ILE DE SAO NICOLAU

1981	RIBEIRA BRAVA								RIBEIRA GRANDE						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
Juillet															
20	2.7	2.1				5.2			5.6	13.3	13.5	9.3	5.8	4.5	2.3
25		9.5						4.2	7.2	10.09	11.0	9.5	8.5	3.7	1.2
TOTAL	2.7	11.6				5.2		9.8	0.5	23.5	20.3	15.3	13.0	6.0	1.2
AOÛT															
4	23.0	22.0	20.0			27.2	48.0	32.0	54.8	80.6	51.5	42.0	43.0	28.0	20.3
TOTAL	23.0	22.0	20.0			27.2	48.0	32.0	54.8	80.6	51.5	42.0	43.0	28.0	20.3
Septembre															
2	60.4	69.9	40.0	61.0	80.0	65.5	60.8	46.0	79.2	65.7	69.5	80.0	85.0	85.1	92.2
8	1.7	1.8	2.2	2.2	2.7	2.5	3.2	3.2	6.0	6.2	4.1	5.5	3.8	1.6	
12							9.5		2.8	8.5	18.8	6.5	7.5		
13	106.5	108.5	91.3	140.0	175.7	136.0	95.6	132.0	139.9	87.0	100.3	154.0	155.0	123.3	92.0
14	3.0	9.5			11.0				6.0			3.7			1.2
25							3.8		16.6	20.0	25.4	7.6			
TOTAL	171.6	189.7	131.3	203.2	269.4	204.0	172.9	181.2	250.5	187.4	218.1	257.3	251.3	210.0	185.4
TOTAL ANNEE	197.3	223.3	151.3	203.2	269.4	236.4	220.9	223.0	325.8	291.5	269.6	315.6	307.3	244.0	206.9

Tableau 5.17 : PLUVIOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS DE L'ILE DE SAO NICOLAU

1981	RIBEIRA BRAVA								RIBEIRA GRANDE						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
Janvier															
12			0.5		1.6				4.0	3.0		1.7			0.2
17	7.2	7.4	6.0		9.0		0.2		15.4	14.0	11.5	10.2			4.0
19	5.0	4.8	8.0	4.8	5.5			16.2	29.5	43.0	32.5	20.0		7.5	2.0
TOTAL	12.2	12.2	14.5	4.8	16.1		0.2	16.2	48.9	60.0	44.0	31.9		7.5	6.2
Juillet															
11					1.5							0.7			
17												10.8			
22												1.0			
TOTAL					1.5							12.5			
AOÛT															
8					0.5				8.0	8.0	5.0	0.4			
18						4.7			16.0		13.5	3.5			
23	1.2	1.3	1.0	3.0	9.7	11.7	6.6	6.6	6.0	21.0	5.6	9.2	7.3	1.6	
24					37.5				73.0	76.5	49.0	51.2			
29	28.5	27.2	22.0	35.3	40.0	53.9	33.6	58.0	103.5	105.5	67.5	72.8	44.2	21.8	46.9
TOTAL	29.7	28.5	23.0	38.3	50.2	53.9	33.6	58.0	103.5	105.5	67.5	72.8	44.2	21.8	46.9
Septembre															
1									6.5	7.8	6.0	6.8			
2									8.2	14.0	7.5	2.4			
TOTAL									14.7	21.8	13.5	9.2			
TOTAL ANNEE	41.9	40.7	37.5	43.1	67.8	53.9	33.8	74.2	167.1	187.3	125.0	126.4	44.2	29.3	53.1

Tableau 5.18 PLUVIOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS DE L'ILE DE SAO NICOLAU

1983	RIBEIRA BRAVA								RIBEIRA GRANDE						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
Janvier															
3	3.2	3.0		2.0	3.6	4.1		5.3							
5	2.0	1.8			2.3	3.2		4.5							
TOTAL	5.2	4.8		2.0	5.9	7.3		9.8							
Août															
12							0.2		3.5	3.5	3.3	2.4			0.6
14	3.0	7	2.4	7	7	1.1		0.1							
20	0.6	0.1		0.9	2.9	1.6	3.9	3.6	3.8	3.7	2.2	1.5	1.5	0.3	0.2
21							1.2		3.8	2.2	3.8	0.9	4.6	6.2	9.2
25	0.3					0.5	2.0		2.2	1.6	2.5				
26	1.6	2.7	2.0	1.6	2.1	2.7	3.0	3.5	3.7	2.3	2.5	7.6	6.4	3.9	2.7
TOTAL	2.8	2.8	4.4	2.5	5.0	5.9	10.3	7.2	17.0	13.3	14.3	12.4	12.5	10.4	12.7
Septembre															
12-13	5.6	5.4	7.0	8.2	9.8	9.5	8.2	10.5	23.1	30.0	26.0	17.1	18.0	19.4	34.3
TOTAL	5.6	5.4	7.0	8.2	9.8	9.5	8.2	10.5	23.1	30.0	26.0	17.1	18.0		34.3
Octobre															
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	5.0	0.0	1.7	14.0	21.0	49.5	25.3	79.4	93.5	78.5
TOTAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	5.0	0.0	1.7	14.0	21.0	49.5	25.3	79.4	93.5	78.5
TOTAL ANNEE	13.6	13.0	11.4	12.7	21.2	27.7	18.5	29.2	54.1	64.3	89.8	54.8	109.9	123.3	125.5

L'exemple le plus frappant est celui du 1er octobre 1983 où l'on a observé jusqu'à 93,5 mm sur R. GRANDE et pas d'averse sur R. BRAVA sauf 5 mm sur Fabateira.

En complément des tableaux, on donne dans les figures 5.8a à 5.8e les cartes isohyètes des précipitations reçues pendant les différentes saisons des pluies et les mois les plus pluvieux.

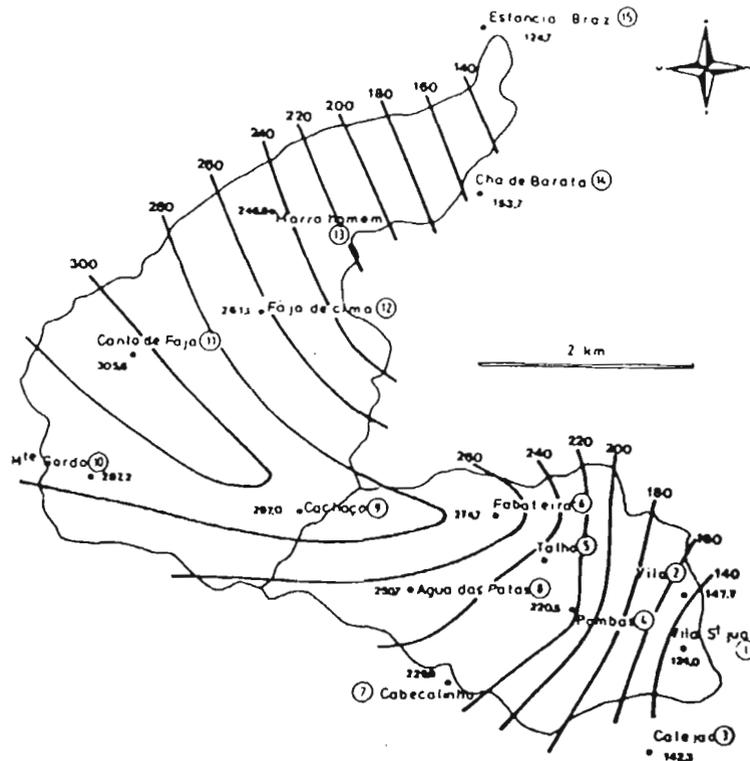


Fig. 5-8 a

SAISON DES PLUIES 1979 (précipitation en mm)

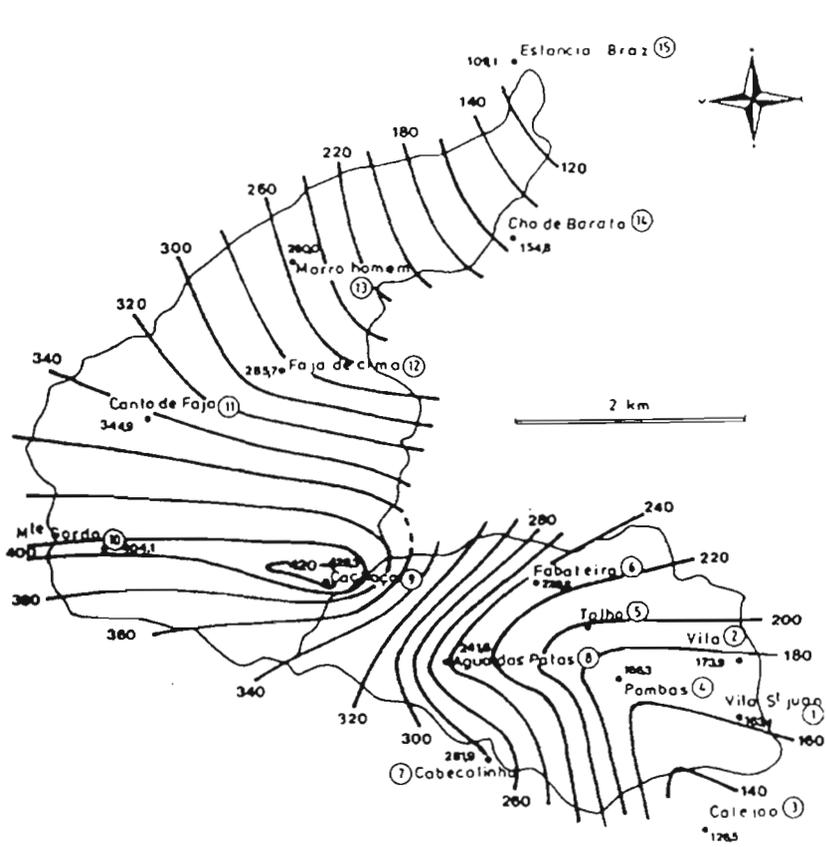


Fig. 5-8 b  
SAISON DES PLUIES 1980

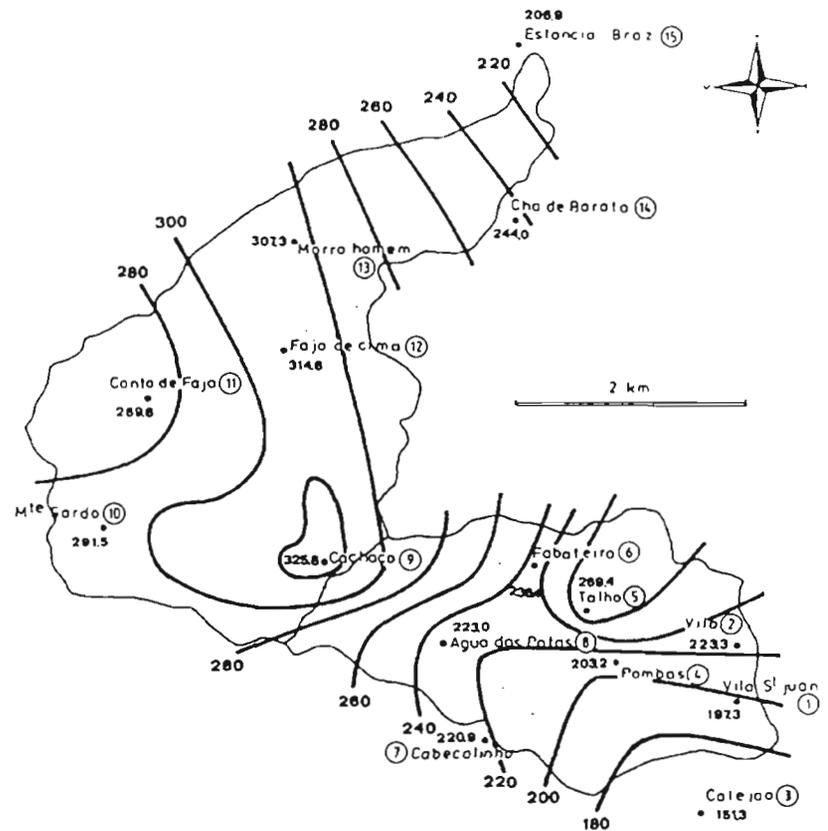


Fig. 5-8 c  
SAISON DES PLUIES 1981

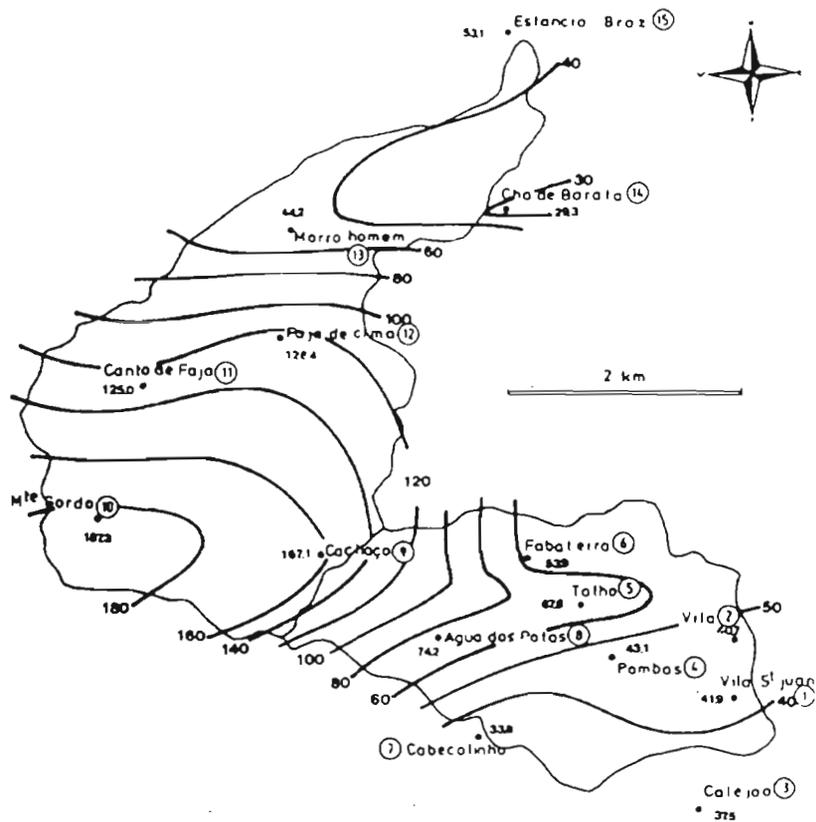


Fig. 5-8d  
SAISON DES PLUIES 1982

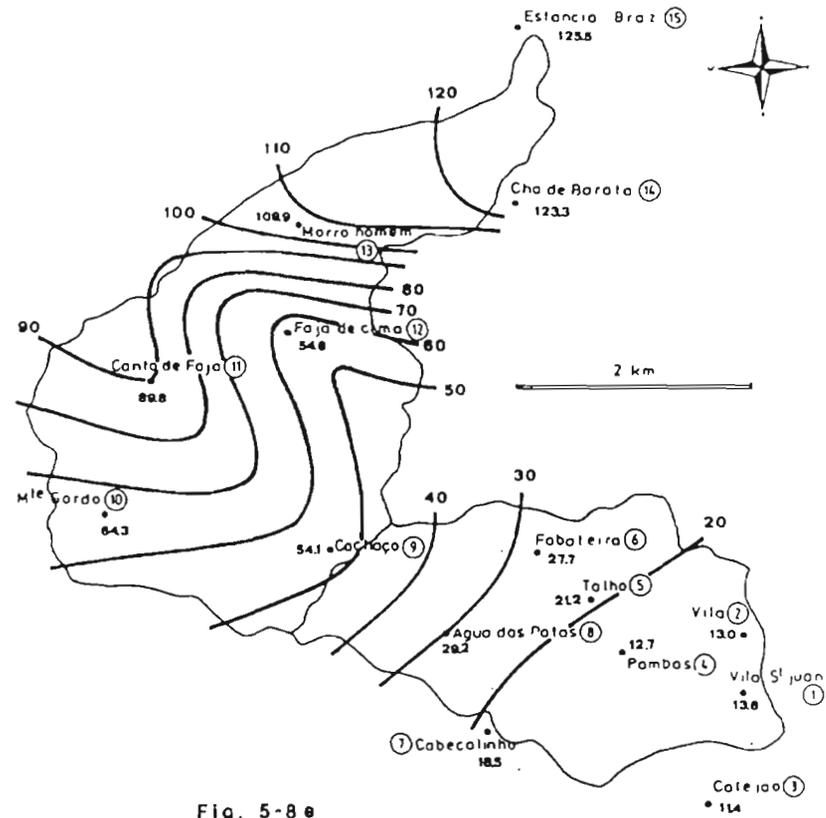


Fig. 5-8e  
SAISON DES PLUIES 1983

La répartition des pluies chaque année met en évidence trois zones de précipitations sur les deux bassins étudiés, zones à l'intérieur desquelles la répartition des averses dépendra de la localisation de l'épicentre des orages ou d'une zonalité altitudinale du flux de mousson sur laquelle on reviendra.

Ces trois zones sont les suivantes :

- a) zone à faibles précipitations, représentée sur R. GRANDE par les stations de Estancia Braz et Chã de Barata et sur R. BRAVA par les stations de Vila.
- b) zone de moyennes précipitations, avec les stations de Morre Homen et de Faja da Cima sur R. GRANDE et les stations de Pombas et Fabateira sur R. BRAVA.
- c) zone de hautes précipitations avec sur R. GRANDE les stations de Monte Gordo, Cachaço et sans doute Canto de Faja, et sur R. BRAVA le haut du bassin avec Cachaço et Agua das Patas.

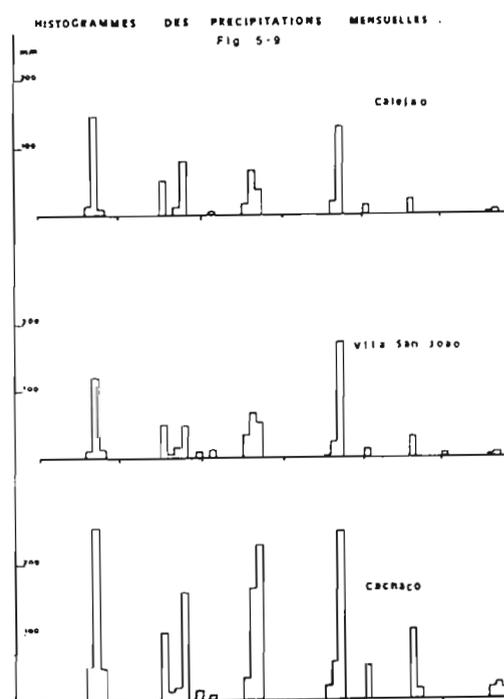
La répartition des pluies dans l'année est également très variable. Les plus hors saison peuvent être observées de novembre à mars mais concernent une part marginale du total annuel (en moyenne moins de 6 %) et peuvent ne pas être observées du tout. On relève cependant une exception dans nos observations : les précipitations non négligeables du mois de janvier 1982 (maximum 60 mm au Monte Gordo) correspondant à une descente exceptionnelle de masses d'air polaire. Celles-ci sont responsables à la même époque, sur le continent, des pluies du HEUG

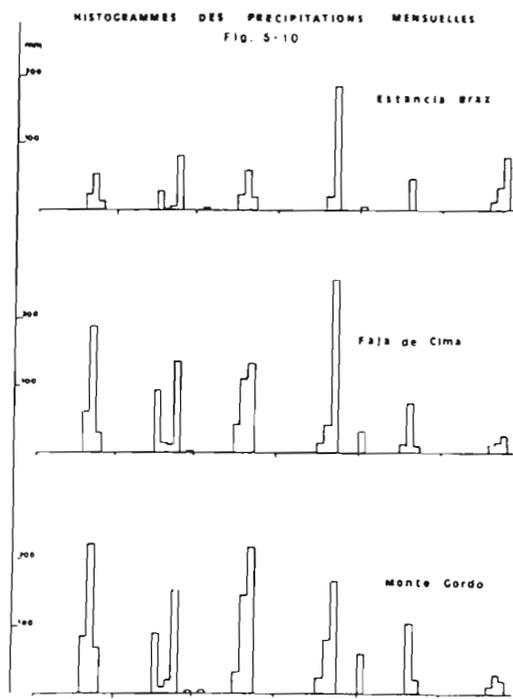
de Mauritanie et du Sénégal. Ces pluies lorsqu'elles sont observées restent négligeables au plan du bilan hydrique.

Les mois d'avril, mai et juin sont par contre des mois totalement secs sur la chronique la plus ancienne de l'île.

La saison des pluies est généralement observée de juillet à octobre mais peut être considérablement écourtée. Les pluies de juillet et d'octobre sont en règle générale moins abondantes que celles d'août et septembre (en 1979, octobre a été cependant le mois le plus pluvieux).

Septembre reçoit les précipitations moyennes les plus abondantes : 60 % en moyenne du total annuel (sans compter les deux années les plus sèches de 1982 et 1983).





## 2.2. LAMES D'EAU PRECIPITEES

Les cartes d'isohyètes permettent le calcul des lames d'eau précipitées sur les bassins étudiés.

Les différentes valeurs ont été réparties dans le tableau 5.18. On a indiqué les valeurs mensuelles des mois de saison des pluies et le total de la lame précipitée utile à l'analyse du bilan correspondant à la saison des pluies. En complément, le volume précipité pendant cette période sur les deux bassins est donné en milliers de m<sup>3</sup>.

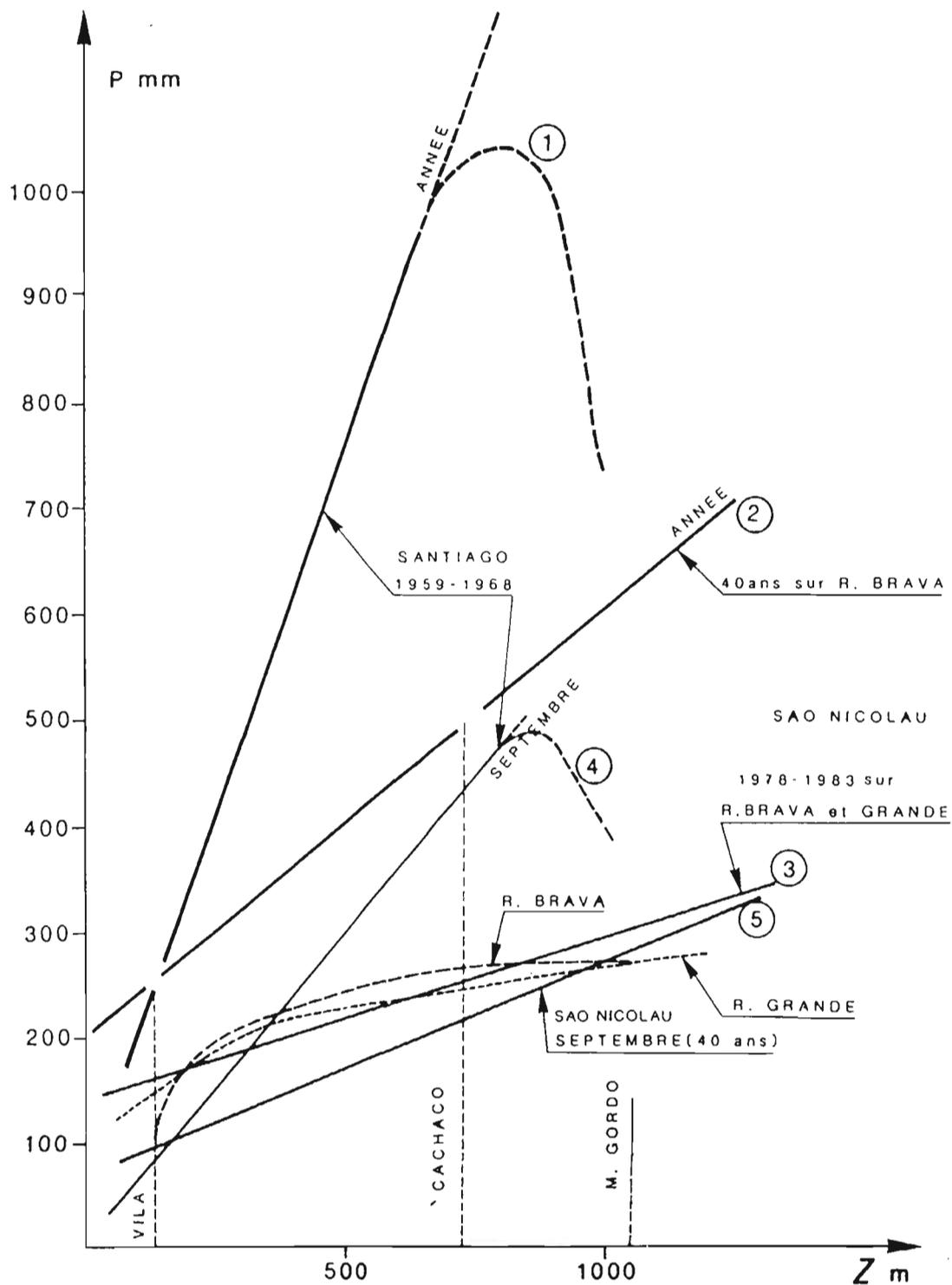
A l'exception de 1978 -averse exceptionnelle en septembre- le bassin de la Ribeira BRAVA reçoit systématiquement moins de précipitations que le bassin de la Ribeira GRANDE.

Année	Mois	Ribeira Brava (6,7 km <sup>2</sup> )		Ribeira Grande (11 km <sup>2</sup> )	
		mm	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	mm	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
1978	Août	65,1		58,8	
	Septembre	302,0		190,4	
	Octobre	16,6		39,2	
	Saison	383,7	2571	288,4	3172
1979	Juillet	85,0		95,6	
	Août	6,6		13,0	
	Septembre	15,3		15,8	
	Octobre	96,4		136,2	
Saison	203,3	1362	260,6	2867	
1980	Juillet	33,7		34,2	
	Août	85,0		120	
	Septembre	165,7		92,5	
	Saison	284,4	1905	246,7	2714
1981	Juillet	3,8		13,3	
	Août	25,1		50,8	
	Septembre	195,8		231,0	
	Saison	224,7	1505	295,1	3246
1982	Août	48,6		73,0	
	Septembre	0,0		10,5	
	Saison	48,6	326	83,5	918
1983	Août	6,3		13,6	
	Septembre	9,8		22,6	
	Octobre	2,6		42,9	
	Saison	18,7	125	79,1	870
Moyenne	des 6 années	193,9	1299	208,9	2298

Tableau 5.19: Lames d'eau précipitées pendant la saison des pluies durant la période 1978-1983 sur les bassins de Sao Nicolau

Fig. 5-11

VARIATION DES HAUTEURS DE PRECIPITATION AVEC L'ALTITUDE



En 1979, 1980, 1981, les apports météoriques de la vallée de VILA ne correspondent qu'à 80 % de ceux de la vallée de FAJA. Pour les années très sèches de 1982 à 1983, le pourcentage tombe à 60 et 20 %, ce qui traduit la position "sensible" de la vallée de Ribeira BRAVA, en bordure de la partie la plus arrosée de l'île mais aussi au contact des zones orientales beaucoup plus arides. La carte des isohyètes interannuelles de l'île de São Nicolau proposée dans la première partie permet d'évaluer la lame d'eau moyenne (sur 40 ans) reçue :

- par le bassin de la Ribeira BRAVA, à 360 mm
- par le bassin de la Ribeira GRANDE, à 425 mm (volumes précipités respectivement de  $2.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  et  $4.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ )

Le rapport des deux lames est de 0,85. Ce rapport -et donc les ressources du bassin de Vila da Ribeira BRAVA- semblerait diminuer lorsque les conditions de pluviosité s'orientent vers la sécheresse.

### 2.3. GRADIENT PLUVIOMETRIQUE

L'effet orographique sur la genèse convective des précipitations est un phénomène constant des archipels de la zone intertropicale. On relève un gradient altimétrique positif des précipitations souvent très constant dans le temps pour des conditions de précipitations comparables et sur des versants de même orientation. Les cartes isohyètes montrent d'emblée que São Nicolau n'échappe pas à cette règle.

Les deux bassins étudiés étant "au vent" de l'île de São Nicolau, mais orientés différemment, (E-W pour le bassin de la Ribeira BRAVA, NE-SW pour celui de la Ribeira GRANDE), il a paru intéressant de comparer les profils pluviométriques passant par :

- Estancia Braz, Morre Homen, Faja de Cima, Canto de Faja, et Monte Gordo pour la R. GRANDE
- Vila, Pourbas, Agua das Patas, Cachaço et au-delà Monte Gordo pour la R. BRAVA.

La figure 5.11 montre les profils établis pour les précipitations moyennes annuelles calculées sur les six années d'études (de 1978 à 1983). Ceux-ci sont assez peu différents et une relation moyenne a été calculée pour cette période. Celle-ci s'écrit :

$$P_{\text{annuelle}} = 0,16 z + 137 \text{ avec } r = 0,89$$

et traduit un gradient très faible qui ne correspond pas du tout à celui que l'on obtient entre VILA et CACHACO pour 40 années d'observation. Celui-ci qui caractérise un fonctionnement dans des conditions normales du bassin de réception de la Ribeira BRAVA, est donné dans l'équation suivante (2) :

$$P_{\text{annuelle}} = 0,41 a + 200$$

Pour SANTIAGO, BABAU et AI (1981) ont déterminé pour la période 1959-1968 (relativement abondante) et pour six stations de l'île la relation :

$$P_{\text{annuelle}} = 1,4 z + 80.$$

On relève, outre ce fort gradient -mais tout est relatif : il est souvent plus fort encore dans des zones plus arrosées- une inversion de la tendance à partir de 800, 900 m avec donc une baisse des précipitations très sensible. Sur São Nicolau, on note sans doute cette tendance dans le palier observé au Monte Gordo.

Le mois le plus pluvieux -septembre- présente sur les postes de Vila et Cachaço (40 ans) une variation altimétrique des précipitations qui s'écrit :

$$P_{\text{sept}} = 0,215 z + 65$$

A Santiago, on relève un gradient trois fois supérieur :

$$P_{\text{sept}} = 0,6 z$$

Ces variations du gradient des précipitations en fonction de l'altitude, d'une période à l'autre pour un même lieu, d'une exposition à l'autre, d'une île à l'autre du même archipel (même si cela se justifie par la situation plus arrosée de Santiago), montrent bien sûr des valeurs d'autant plus faibles que les abats d'eau sont peu importants, mais surtout qu'il serait vain pour l'archipel du Cap Vert de compter sur ces gradients et l'hypsométrie pour calculer les lames d'eau précipitées.

## 2.4. CLASSEMENT DES HAUTEURS JOURNALIÈRES DE PLUIE

Pour huit stations choisies en fonction de leur exposition et de leur altitude, on a effectué un décompte des jours de pluie par tranches de hauteurs journalières de précipitation sur les six années d'études (1978-1983 : résultats cumulés) (cf. tableau en % n° 5 20).

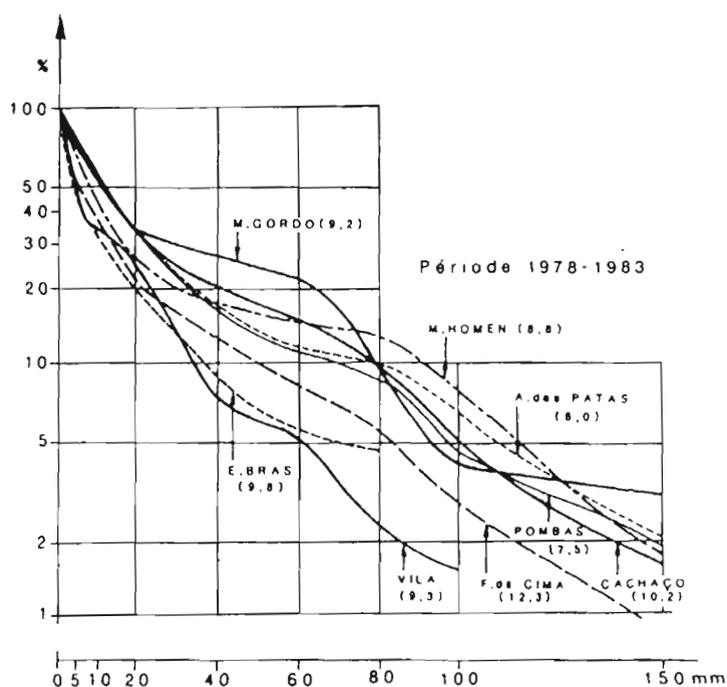
Tranche de P (mm) Station et Nombre moyen jours de pluie en %	0-5 mm	5-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-150	> 150
Vila (9.33)	57.1	8.93	10.71	16.07	1.79	3.57	0	1.79	0
Pombas (7.5)	42.2	6.67	17.78	17.78	4.44	2.22	4.4	2.22	2.22
A. Patas (8.0)	35.4	8.33	22.92	16.67	6.25	0	4.17	4.17	2.08
Cachaço (10.2)	29.5	19.7	18	13.1	4.92	4.92	4.92	3.28	1.64
M. Gordo (9.2)	32.7	14.5	20	7.28	3.64	12.7	5.45	0	3.64
Faja-Cima (12,3)	41.9	20.2	16.2	6.76	6.76	0.01	2.7	2.7	0.019
M. Homen (8.8)	39.6	18.9	17.0	7.55	3.78	0	5.66	5.66	1.89
E. Bras (9.8)	59.3	6.78	15.25	10.17	3.39	0	5.1	0	0

Tableau 5 20 : Pourcentages d'averses calculés pour différentes tranches de pluies journalières sur la période 1978-1983

Les stations les plus basses (VILA et E. BRAZ) montrent le % le plus élevé de petites pluies. Les averses les plus fortes représentent un pourcentage plus élevé en altitude. La figure 5.12 où l'on a représenté les pourcentages d'averses dépassant les différents seuils choisis est particulièrement éloquent.

On relève les courbes "basses" des stations les plus proches de la mer, une courbe intermédiaire pour les stations de FAJA da CIMA et des courbes "hautes" pour les stations de CACHACO et du MONTE GORDO ainsi que pour les stations comme MORRE HOMEN, POMBAS et AGUA das PATAS adossées aux

Fig. 5-12 Répartition en % des fortes averses journalières sur la période d'étude (entre parenthèses: nbr. de jours de pluie)



reliefs abrupts qui les dominent. Les courbes hautes présentent en outre un bombement caractéristique entre 40 et 80 mm indiquant un pourcentage non négligeable d'averses de ce type pour la période 1978-1983. Ce phénomène retrouvé en Afrique (Albergel, 1984) montre que les déficits pluviométriques de la

période actuelle affectent davantage les pluies modestes et le nombre total de jours de pluie.

Pour CACHACO et VILA on a d'ailleurs comparé les résultats 1978-1983 à ceux d'une période de six ans choisie entre 1945 et 1950 :

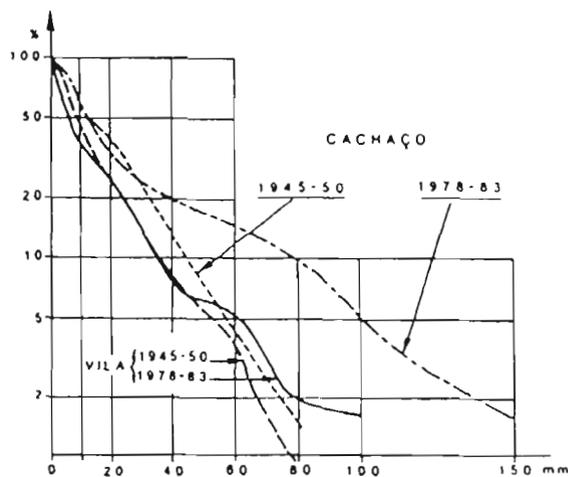
Tranche de P (mm) Station et Nombre moyen jours de pluie en %	0-5 mm	5-10	10-20	20-40	40.60	60.80	80-100	100-150	> 150
Cachaco (22 j)	21.2	28.8	12.1	25	8.33	3.03	1.52	0	0
Vila % (17,3 j)	31.7	26.0	19.2	15.4	3.85	2.89	0.96	0	0

Tableau 5.21: Pourcentages d'averses calculés pour différentes tranches de précipitations journalières sur la période 1945-1950

Pour cette époque antérieure le nombre de jours de pluie annuel était pratiquement le double de celui observé pendant nos études. Les courbes données dans la figure 5.13 mon-

trient une évolution particulièrement importante pour la station d'altitude qui ne connaît plus sur 1945-1950 l'abondance relative des fortes pluies comprises entre 40 et 80 mm.

Fig. 5-13 Comparaison de deux périodes d'observation des averses journalières



Cette rapide analyse montre que le régime des précipitations journalières est particulière-

ment sensible aux fluctuations climatiques : la structure des averses est remise en question.

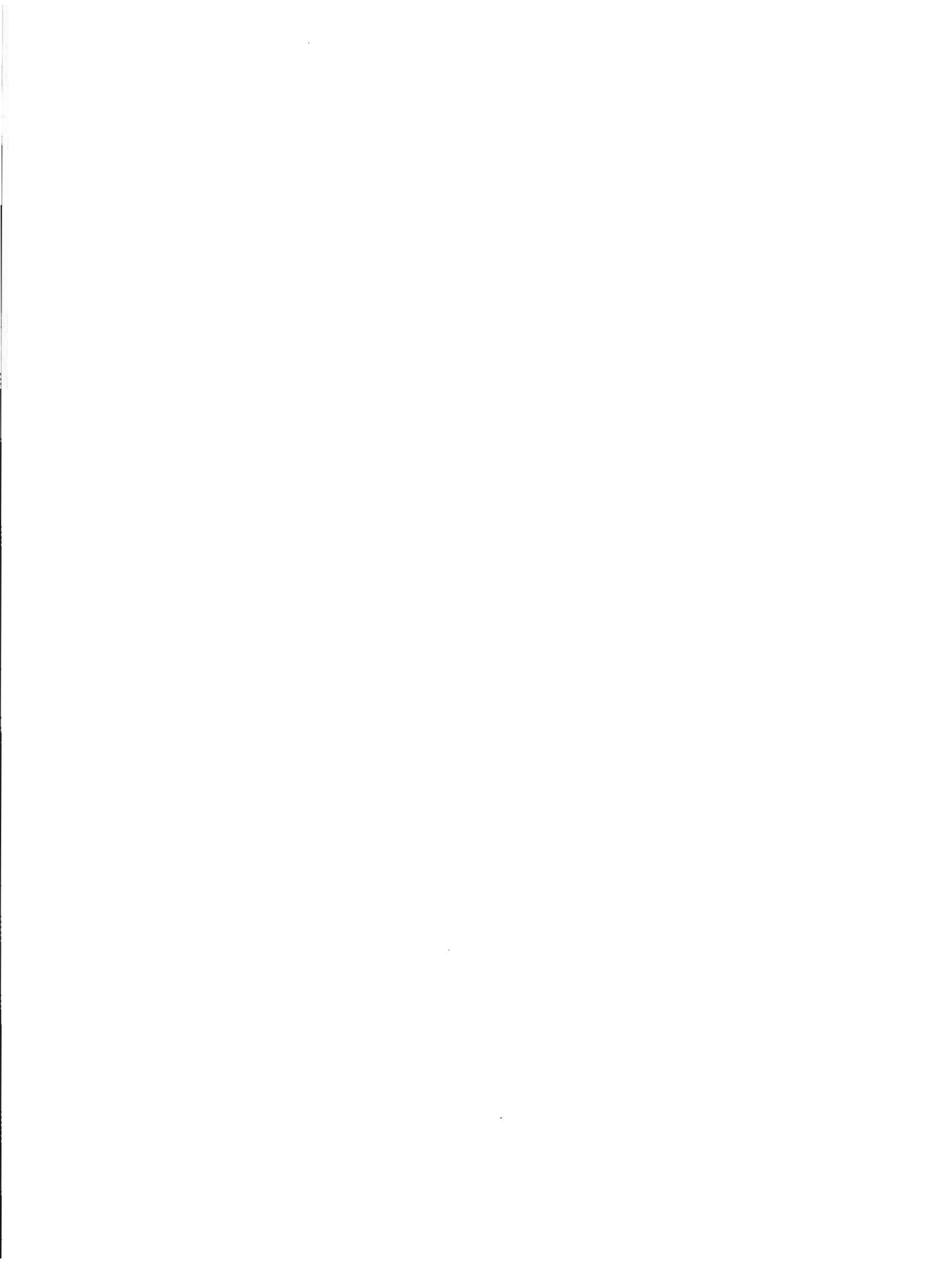


Averse sur le bassin de R. Grande (Photo Legal).



# CHAPITRE VI

## LES EVENEMENTS HYDROPLUVIOMETRIQUES OBSERVES SUR LES BASSINS (1978-1983)



# LES EVENEMENTS HYDRO-PLUVIOMETRIQUES OBSERVES SUR LES BASSINS (1978-1983)

## 1. INVENTAIRE DES EVENEMENTS

Sans reprendre la chronique des précipitations donnée précédemment, on a voulu identifier ici dès l'abord les principales averses (ou épisodes pluvieux) dont l'abondance a, ou aurait, pu entraîner la genèse de crues.

Cet inventaire est indiqué dans le tableau 6.1 ci-après :

Sur six années d'observations, quatre épisodes pluvieux seulement ont donné lieu à une réaction simultanée de ruissellement sur les deux bassins.

Sur la Ribeira BRAVA, on relève six crues dont une petite crue pratiquement négligeable.

ANNEE	DATE	RIBEIRA GRANDE		RIBEIRA BRAVA	
		PLUIE de...à...mm	CRUE	PLUIE de...à...mm	CRUE
1978	25-27 Août 26 septembre 14 Octobre	13,5 à 12 55 à 180 7 à 67	absence forte absence	12 à 75 63 à 293 -	absence forte
1979	20-21 Juillet 21-22 Octobre	30 à 126 69 à 146	absence absence	48 à 96 48 à 83	petite pas
1980	29-30 Juillet 14 Août 23 Août 5 Septembre 9 Septembre	29 à 43 27 à 80 9 à 64 12 à 20 8 à 218	absence absence absence absence cru	17 à 39 30 à 62 14 à 36 14 à 21 23 à 90	absence absence absence absence cru
1981	4 Août 2 Septembre 13 Septembre	20 à 81 66 à 92 87 à 155	absence cru cru	20 à 48 40 à 80 91 à 176	absence cru cru
1982	29 Août	20 à 77	absence	22 à 41	petite
1983	12-13 Sept. 1er Octobre	17 à 34 14 à 93,5	absence cru		absence absence

Tableau 6.1. : Inventaire des principaux événements pluviométriques pendant la période d'études.

Les enregistrements montrent sept petites réactions ponctuelles de la Ribeira consécutives au "ruissellement urbain" de VILA (écoulement des caniveaux) ; ces "réactions" ont été négligées après contrôle à l'amont de VILA de l'inexistence d'apports du bassin. Une crue aurait été observée en février 1982 ; nous ne possédons pas d'enregistre-

ment de cet événement et les témoignages tendent à identifier cette "crue" comme une réaction urbaine de volume très modeste.

Cinq crues seulement ont été observées sur la Ribeira GRANDE.

## 2. MESURE DES DEBITS

L'étalonnage des stations hydrométriques n'a pu se faire qu'au coup par coup en fonction des rares événements hydropluviométriques observés et du choix des opérateurs de privilégier, suivant les circonstances, telle ou telle station, laissant à des collaborateurs occasionnels ou peu expérimentés le suivi de la deuxième station. A ces difficultés se sont ajoutés pour Vila celles d'un détarage évolutif de la station dû aux modifications du lit en cours de crue. La rapidité du courant, des variations de hauteurs d'eau, l'inadéquation de certains équipements ont amené les hydrologues à multiplier les mesures topographiques (section de mesure, pente de la ligne d'eau, ...) afin de compléter l'information courantométrique. Différentes approches ont été utilisées (formules hydrauliques, Manning-Strickler) en concurrence des méthodes classiques basées sur l'évaluation du champ des vitesses dans la section de mesures. Ajoutons que les importantes charges solides n'auraient pas permis une rapide mise au point des mesures de débit par dilution (jaugeages chimiques) et donc d'utiliser cette méthode à São Nicolau.

Nous avons proposé aux opérateurs le protocole suivant :

*\*\* Cas de crues "probablement simultanées" sur les deux bassins (mauvais temps généralisé)*

*Le choix initial se portera sur la station de RIBEIRA BRAVA où temps de réponse et temps*

*de base sont plus courts que sur RIBEIRA GRANDE.*

*La préparation du matériel doit être faite dès la pluie.*

*Les jaugeages seront effectués "en continu" à partir de verticales matérialisées ou repérées à l'avance, en notant pour chacune les variations de hauteur à l'échelle et l'heure. Suivant le moment de la crue (montée ou décrue), la mesure pourra ne comporter que quatre ou cinq verticales (trois sur RIBEIRA GRANDE) ou être plus fine. Lorsque ces vitesses sont importantes, l'ensemble suspendu saumon-moulinet est animé d'oscillations amont-aval ; la durée de la mesure pour chaque point doit tenir compte de cela et porter sur le même nombre d'allers et retours (un ou deux) sauf si la période de l'oscillation est lente (plus de vingt.).*

*La profondeur de la section étant connue, on veillera à ne pas descendre le moulinet à moins de 40 cm du fond pour éviter toute détérioration du matériel par le charriage.*

*Des mesures de surface au flotteur seront faites conjointement (cf. plus loin) et généralisées en cas de "cafouillage" du matériel hydrométrique.*

*Des prélèvements d'eau pour mesure des débits solides doivent être faits simultanément.*

*L'organisation des mesures sera articulée dans la mesure du possible sur le schéma suivant :*

- l'hydrologue et deux aides se mettent en place sur RIBEIRA BRAVA au pont (installation des matériels, préparation éclairage si nécessaire, etc.), puis mesures de la crue.
- une deuxième équipe composée d'un chauffeur M.D.R. ou ex-BURGEAP, à mobiliser pour la circonstance, et d'un aide vont avec un second véhicule (MEHARI) sur RIBEIRA GRANDE pour faire des mesures au flotteur et prélèvements d'eau pour débits solides (un chronomètre, deux sifflets et dix jerrikans).
- l'équipe de l'hydrologue rejoint RIBEIRA GRANDE lorsque la décrue de RIBEIRA BRAVA est largement avancée, pour y poursuivre les mesures.

En cas d'étalonnage satisfaisant de RIBEIRA BRAVA, on passera à la solution inverse.

\* Cas de crue unique sur l'un des bassins (mauvais temps localisé)

Pas de problème de choix dans l'intervention.

Conduite des mesures comme déjà dit.

\* Mesure des débits de fin de crue, écoulement de base, tarissement

Elles suivent celles de la crue.

Les mesures seront effectuées dès que possible au Wading à la perche au droit de la station,

avec toute la précision nécessaire. Lorsque le débit aura suffisamment diminué, on procédera au nivellement de la section, puis on dégagera des alluvions le petit canal bétonné de RIBEIRA BRAVA afin de canaliser l'écoulement et de le mesurer au micro-moulinet. A ce stade de l'écoulement, on ne se préoccupera plus de la relation hauteur-débit de la station (niveau en-dessous de zéro) mais, comme pour les autres jaugeages, on notera avec précision l'heure de la mesure.

\* Mesures de vitesses au flotteur

On matérialisera sur la berge le lieu de mise à flot des flotteurs. Cet endroit sera choisi 30 à 50 m en amont de la station dans un bief rectiligne sans grandes variations de section.

La longueur du bief de contrôle des vitesses sera mesurée avec précision au milieu de la section.

Les flotteurs seront constitués par divers objets de récupération à SAO NICOLAU (boîtes, bouteilles, ...). On pourrait les peindre en blanc pour les rendre plus visibles.

Compte tenu du bruit de la rivière en crue, les deux opérateurs devraient communiquer par sifflets par un code simple : l'"opérateur-chrono" indique par deux coups de sifflets qu'il est prêt à faire la mesure ; l'"opérateur-flotteur" jette le flotteur au milieu de la section et donne un coup de sifflet lorsque celui-ci touche l'eau. Déclenchement du chrono. Arrêt du chrono lors du passage du flotteur au droit de la station. Faire au moins

trois mesures (vérifier que les temps sont voisins) pour une vitesse à déterminer. Sur le carnet, indiquer les temps mesurés en regard de la verticale mesurée au même moment si jaugeage simultané ou préciser la cote et l'heure de la mesure.

Indiquer l'arrêt provisoire des mesures à l'"opérateur-flotteur" par trois coups de sifflet.

La rapidité de ces mesures doit permettre de les utiliser systématiquement lors de la montée rapide des crues.

**\* Dépouillement des mesures de débit**

Les dépouillements de jaugeage seront effectués immédiatement dans les jours qui suivent les mesures.

Planimétrage des paraboles de vitesse des différentes verticales.

Dépouillement classique pour faibles variations de hauteur pendant le jaugeage (inférieur à 20 cm).

Etalonnage des verticales : une courbe par verticale en reprenant les points des jaugeages en continu et les points des jaugeages complets.

Comparer mesures flotteurs aux jaugeages au moulinet.

**\* Conclusion**

Les détails donnés ci-dessus (et plus loin) sont surtout destinés à faciliter la formation des aides de l'hydorlogue, agents du M.D.R. ou autres, à obtenir d'eux des manipulations simples mais réflexes qui évitent les pertes de temps.

Il conviendra d'entraîner ce personnel par petite pluie (sans écoulement) pour les former à une mobilisation rapide sur le terrain avec montage du matériel afin d'obtenir la plus grande efficacité le jour de la crue.

Soulignons enfin l'intérêt de suivre l'enregistrement de la crue sur le limnigraphe pendant la série de mesures."

Nous proposons ci-après les principaux résultats de ces travaux avec en particulier la liste des jaugeages effectués et les barèmes utilisés pour la traduction en débits des limnigrammes.

## **2.1. MESURES DE DEBIT SUR LA RIBEIRA BRAVA A VILA**

### **1°) 1978**

Lors de la décrue du 26 septembre 1978, trois jaugeages seulement ont été effectués pour des cotes de 0,30 à 0,60 m, alors que la crue a atteint 2,70 m. Les vitesses étaient telles

qu'aucun équipement de mesure n'aurait pu être utilisé. La formule de MANNING-STRICKLER a été employée par GALLAIRE (1979). Celle-ci s'écrit :

$$U = K R^{0.67} I^{0.5}$$

avec U, vitesse moyenne dans la section  
 K, coefficient de Manning-Strickler appelé aussi coefficient de rugosité du fond et des parois  
 R, rayon hydraulique en mètres (périmètre mouillé/section)  
 et I, la pente de la ligne d'eau

déterminée sur un profil en long du niveau de la section de mesures.

K a été évalué à 0,35 à partir de trois jaugeages, valeur qui a été confirmée par la suite et qui correspond à une valeur palier indépendante à partir d'un certain seuil de l'augmentation de la hauteur d'eau. I a été mesuré sur un profil longitudinal d'environ 100 m correspondant au maximum de la crue (I = 0,0224)

Les jaugeages sont les suivants (avec H hauteur d'eau, V vitesse moyenne et Q débit) :

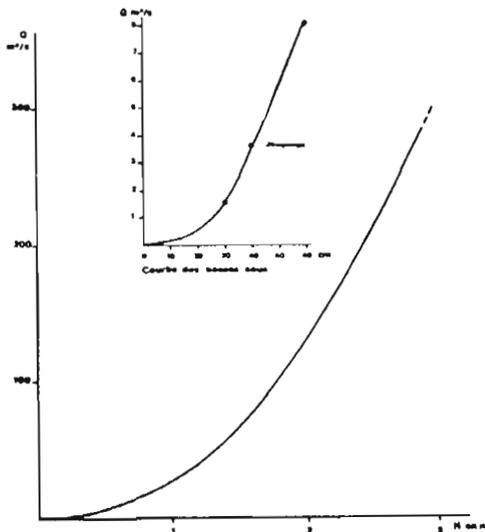
Tableau 6.2

26.09.78					27.9.78
H m	0.02	0.60	0.40	0.30	
V moy. ms <sup>-1</sup>	0,4	2,80	2,40	1,50	0,60
Q m <sup>3</sup> D <sup>-1</sup>	0,01	8,1	4,0	2,60	0,70

H : Hauteur d'eau, V : vitesse moyenne ; Q débit

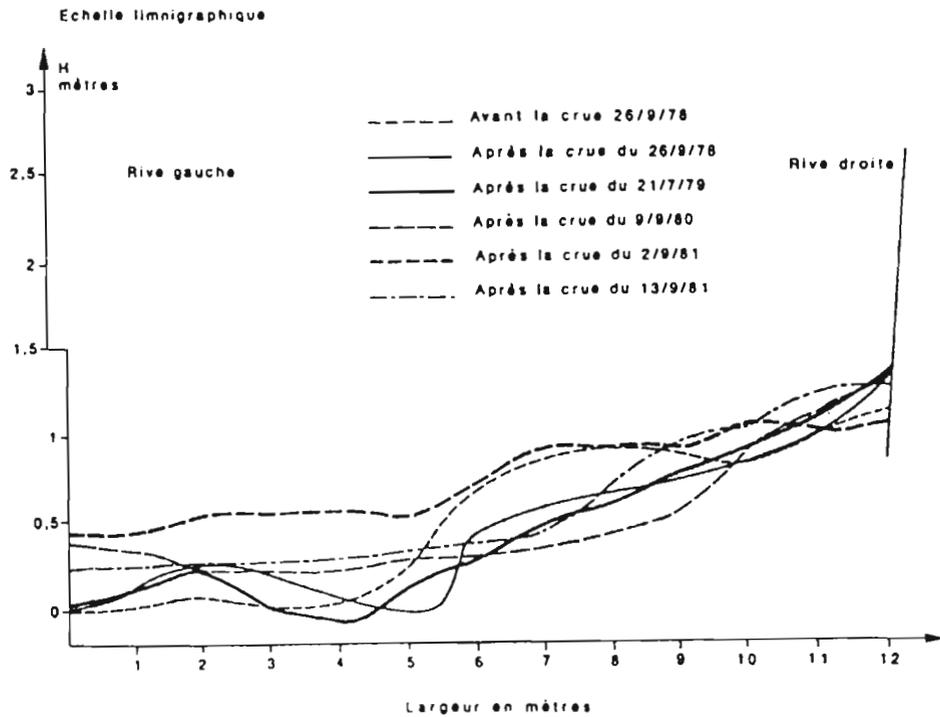
La figure 6.1 montre la courbe de tarage initialement retenue pour la crue de 1978.

Fig. 6-1 COURBE DE TARAGE DE LA Station de VILA DE RIBEIRA BRAVA



Les mesures réalisées en 1981 ont montré qu'elle était largement surestimée pour les hautes eaux. La vitesse moyenne de 9 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> au maximum de crue paraissait en effet peu crédible. La quasi coïncidence des sections de 1978 et du 13 septembre 1981 suggère le même étalonnage que nous indiquons plus loin. Ainsi, au lieu d'un maximum de 253 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> en 1978, la crue n'aurait pas dépassé un débit de 215 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. La vitesse moyenne maximale aurait alors été de 7 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Ceci signifie que l'évaluation du coefficient K doit être réduite à une valeur de 30 environ. Les modifications du lit de la RIBEIRA sont indiquées dans la figure 6.2.

Fig. 6-2 PROFIL EN TRAVERS DE LA RIBEIRA BRAVA  
au droit du limnigraphe



2°) 1979

Le seul événement hydrométrique se situe en juillet ; il n'apporte pas d'éléments nouveaux à l'appréciation de l'étalonnage de la station.

3°) 1980

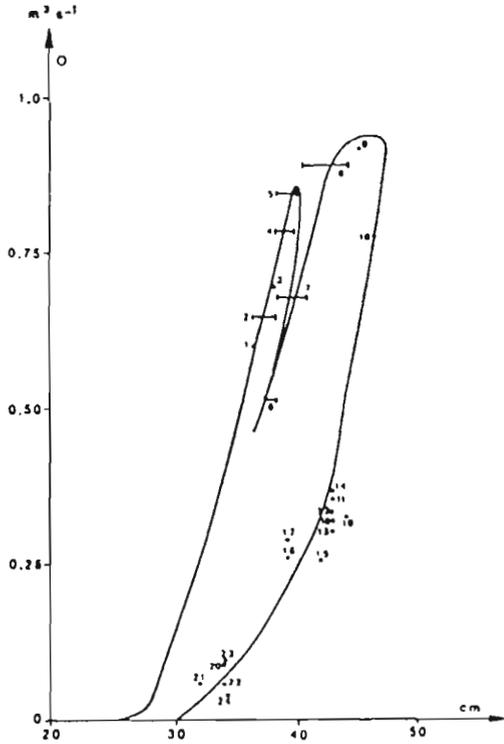
La crue du 9 septembre permet une bonne estimation des débits ayant transité à la station entre 0,28 et 0,46 m à l'échelle. Les résultats reportés dans la figure 6.3 illustrent bien le détarage permanent de la section due à une évolution constante de la section.

24 jaugeages ont été réalisés pour des débits compris entre 50 et 900 l.s-1.

Tableau 6.2 Jaugeages du 9/9/80

N°	H cm	Q m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	N°	H cm	Q m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
1	36	0,605	13	43	0,305
2	36-38,5	0,645	14	43	0,363
3	38,5	0,695	15	42	0,254
4	38,5-40	0,785	16	39	0,258
5	38,5-40	0,845	17	39	0,287
6	37-38	0,515	18	43	0,319
7	38,5-41	0,675	19	44	0,376
8	40-44	0,890	20	34	0,097
9	45	0,920	21	34	0,055
10	46	0,775	22	34	0,098
11	43	0,355	23	34	0,053
12	43	0,285	24	32	0,032

Fig. 6.3 EXEMPLE DE TARAGE EVOLUTIF DES BASSES EAUX  
MESURE LORS DE LA CRUE DU 9 SEPTEMBRE 1980  
(Ribeira Brava à Vila)



#### 4°) 1981

Une première série de mesures a pû être faite à l'occasion de la crue du 2 septembre. La liste est donnée ci-après (tableau 6.3) :

Tableau 6.3 Jaugeages du 2.9.81

H cm	Q m³s⁻¹	H cm	Q m³s⁻¹
150	36.6	170	57.7
160	41.4	111	15.2
160	51.7	94	7.2
160	38.8	50	0.55
175	72.6		

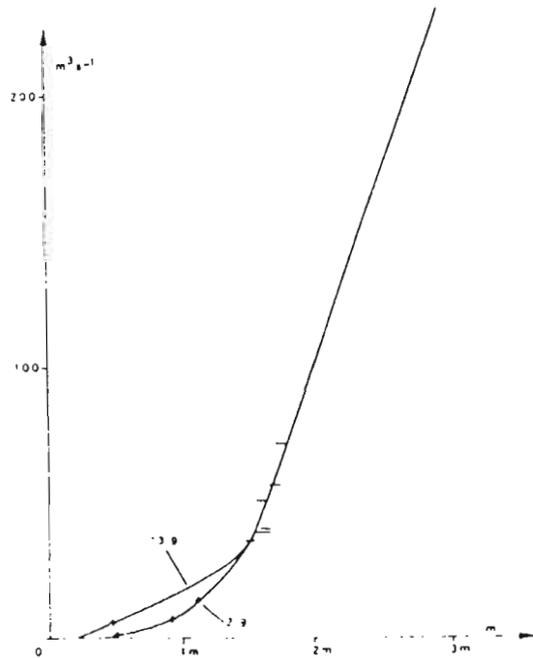
Le 13 septembre, un seul jaugeage a été effectué (l'équipe étant mobilisée à Estancia Braz).

$H = (55 - 47)$        $Q = 6,25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$   
avec un maximum de vitesse de  $3,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Ce jaugeage montre une reprise des dépôts du 2 septembre par la crue du 13 et une nouvelle modification de la section de mesure (fig.6.2).

La figure 6.4 propose l'étalonnage 1981 (avec deux courbes de basses eaux).

Fig 6.4 RIBEIRA BRAVA  
COURBE DE TARAGE



Les tableaux 6.4 indiquent pour les deux crues de 1981 la superficie des sections mouillées et les débits correspondants en fonction des hauteurs d'eau.

H	section mouillée	H	S M en m <sup>2</sup>						
1,40	0,0	0,60	0,48	1,00	3,22	1,40	8,40	1,80	13,2
0,50	0,15	0,80	1,66	1,20	5,80	1,60	11,30	20,0	16,2

Vila de Ribeira Brava  
Section mouillée en fonction de la hauteur à l'échelle

H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
0,40	0	0,60	2,0	1,00	10,0	1,40	2,80	1,80	72,0
0,50	0,60	0,80	5,0	1,20	18,0	1,60	47,0	2,00	100,0

BAREME de la courbe de tarage de la crue du 2 09

H	section mouillée	H	S M en m <sup>2</sup>						
0,20	-	0,80	4,48	1,40	11,5	2,00	19,3	2,60	27,1
0,40	1,10	1,00	6,39	1,60	14,1	2,20	21,9	2,80	29,7
0,60	2,75	1,20	8,90	1,80	16,7	2,40	24,5		

Crue du 13.9 - Section mouillée

H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
0,20	-	0,80	13,5	1,40	30,4	200	100,0	260	187
0,40	5,0	1,00	18,5	1,60	47,0	220	129,0	280	215
0,60	9,50	1,20	23,5	1,80	72,0	240	158,0		

BAREME de la courbe de tarage de la crue du 13 09

Tableau 6.4: Section mouillée et barèmes respectifs de la Ribeira Brava pour les crues du 2 et du 13 septembre 1981

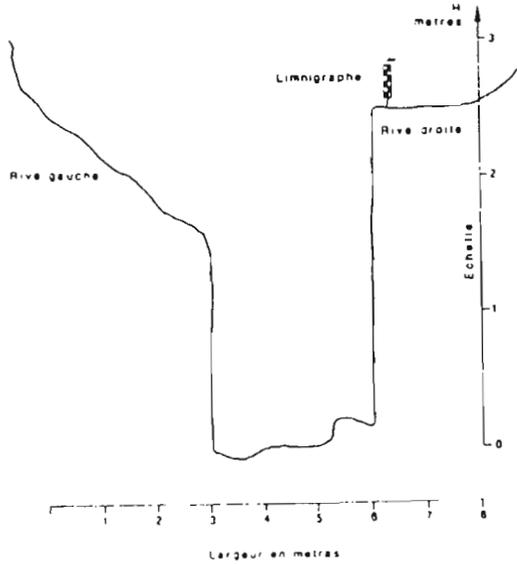
En 1982 et 1983 aucun jaugeage n'a été effectué sur la RIBEIRA BRAVA faute d'écoulement notable.

En conclusion, la courbe de tarage de la figure 6.4 paraît être commune à la période étudiée pour les hautes-eaux. Les moyennes et basses-eaux semblent devoir varier entre les courbes du 2 septembre et du 13 septembre 1981 montrant des phases extrêmes des variations du lit au droit de la section.

## 2.2. MESURES DE DEBIT SUR LA RIBEIRA GRANDE A ESTANCIA BRAZ

La section de mesures est creusée dans le basalte et présente une stabilité d'ensemble peu altérée par les quelques dépôts de galets et graviers observés d'une crue à l'autre (figure 6.5)

Fig. 6-5 PROFIL EN TRAVERS DE LA RIBEIRA GRANDE  
au droit du téléphérique



Cette stabilité permet d'utiliser un étalonnage unique obtenu sur 1981 lors de la crue du 13 septembre, à partir de 14 jaugeages indiqués dans le tableau 6.5 ci-après.

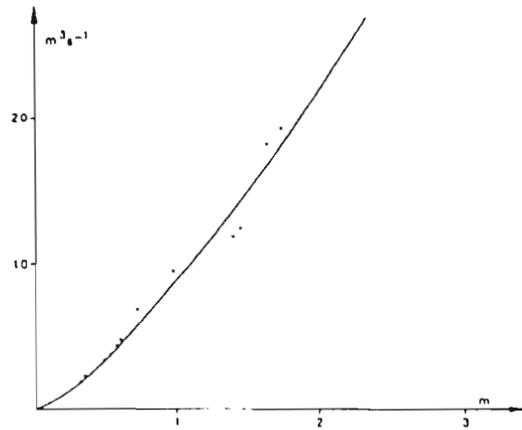
Tableau 6.5. Liste des jaugeages effectués sur R. Grande le 13 9 81

H cm	V ms <sup>-1</sup>	Qm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	H cm	V ms <sup>-1</sup>	Qm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
174	3.59	19.3	60	2.81	4.83
164	3.59	18.3	58	2.70	4.48
145	2.78	12.4	52	2.67	3.92
140	2.78	11.9	49	2.72	3.73
98	2.57	9.56	49	2.43	3.33
72	3.26	6.88	34	2.30	2.20
72	2.63	5.54	31	2.20	1.85

Un petit canal en béton a permis par ailleurs de préciser les faibles débits.

La figure 6.6 donne la courbe de tarage de la station d'ESTANCIA BRAZ.

Fig. 6-6 RIBEIRA GRANDE ESTANCIA BRAZ  
Courbe de tarage



Les tableaux 6.6 indiquent pour différentes côtes à l'échelle la surface de la section mouillée et les débits correspondants.

Cet étalonnage conduit donc à une révision complète des estimations de R. GALLAIRE (1979) sur la relation hauteurs-débits basée sur un coefficient de Manning-Strickler K de 50, beaucoup trop fort ; en effet, STRICKLER, cité par CARLIER (1972), indique pour des parois rocheuses des valeurs de K de l'ordre de 15 à 20.

H	Surface en m2	H	Surface en m2	H	Surface en m2	H	Surface en m2
0	0	55	1,57	110	334	165	5,10
05		60	1,72	115	351	170	5,26
10		65	1,89	120	368	175	5,42
15		70	2,05	125	384	180	5,59
20	0,45	75	2,21	130	397	185	5,74
25	0,61	80	2,37	135	413	190	5,89
30	0,77	85	2,53	140	428	195	6,05
35	0,93	90	2,69	145	445	200	6,21
40	1,08	95	2,85	150	462	205	6,36
45	1,25	100	3,01	155	478	210	6,51
50	1,41	105	3,17	160	494	215	6,67

Ribeira Grande - Estancia Braz  
Section mouillée en fonction de H à l'échelle

H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
0		60	4,40	120	11,20	180	19,10
05	0,25	65	4,95	125	11,80	185	19,80
10	0,50	70	5,50	130	12,40	190	20,50
15	0,75	75	6,10	135	10,05	195	21,25
20	1,00	80	6,70	140	13,70	200	22,00
25	1,30	85	7,20	145	14,35	205	22,75
30	1,70	90	7,70	150	15,00	210	23,50
35	2,15	95	8,30	155	15,65	215	24,25
40	2,60	100	8,90	160	16,30	220	25,00
45	3,05	105	9,45	165	17,00	225	25,75
50	3,50	110	10,00	170	17,70	230	26,50
055	3,95	115	10,60	175	18,40	235	27,25

Barème d'étalonnage de la station Estancia Braz

Tableau 6.6. : Section mouillée et barème d'étalonnage de Ribeira Grande à Estancia Braz

### 3. DESCRIPTION DES EVENEMENTS HYDROPLUVIOMETRIQUES

#### 3.1. LES CRUES DU 26 SEPTEMBRE 1978

##### 3.1.1. A Vila da Ribeira Brava

Le 26 septembre 1978, dès le matin à 7 heures, la bassin de la Ribeira Brava a reçu une petite pluie fine entrecoupée d'épisodes de plus forte intensité mais de courte durée (n'excédant pas 5 à 10 minutes). Les jours précédents, un faible écoulement discontinu de quelques litres par seconde est apparu vers midi.

A 17 h 30 aucune évolution sensible n'était encore apparue ni dans les conditions météorologiques ni dans celles de l'écoulement (1). Peu après, les intensités deviennent très importantes et un écoulement notable commence à 17 h 45. L'eau monte très rapidement pour atteindre son maximum à 18 h après un temps de montée de 15 minutes. Le maximum atteint le tablier du pont soit la cote 2,70 m pour un débit maximum qui a été estimé à  $215 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , soit un débit spécifique de  $32\,000 \text{ l.s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ . A un kilomètre de la mer, le flût court sur une

---

(1) Ceci explique que l'équipe se soit alors déplacée à Estancia Braz pour le contrôle de l'écoulement de la Ribeira Grande qui était alors à sec.

centaine de mètres de largeur dans le fond de la ribeira.

La violence de la crue, son débit énorme pour un aussi petit bassin, les vitesses particulièrement fortes et la taille de certains blocs charriés par le flot donnent à cet événement un caractère très exceptionnel encore qu'il traduise un des aspects traditionnels des calamités subies par l'Archipel.

La décrue est extrêmement rapide ; à 19 h, le débit n'est plus que de  $70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ; à 20 h, la rivière ne coule plus que  $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ; le temps de base de l'hydrogramme de crue est de 2 h 30, mais un écoulement de base se poursuivra entre  $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  à 20 h 30 et quelques litres par seconde dans la journée du 27 septembre.

Les précipitations ont été très élevées sur la moitié amont du bassin avec un maximum de 293,5 mm à Agua des Patas mais seulement de 63,4 mm à Vila. La pluie moyenne reçue par le bassin de la R. Brava est de 240 mm. Le volume écoulé de la crue est de  $700\,000 \text{ m}^3$  soit une lame écoulée de 104 mm et un coefficient d'écoulement de 43,4 %.

Ce coefficient est relativement modeste si on rapporte la lame écoulée à l'ensemble de la lame précipitée le 26 septembre. Mais il faut rappeler que cette lame précipitée comprend les averses préliminaires qui ont duré une dizaine d'heures.

Celles-ci, avec des pics d'intensité non négligeables, si on en juge par le hétérogramme de FAJA (le seul dont nous disposons), ont bien évidemment contribué à une progressive saturation des horizons superficiels et concernant une lame d'eau probablement importante. Ainsi, le gros pic d'intensité de la soirée, responsable de la crue exceptionnelle, intéresse une lame précipitée moins importante que la pluie moyenne calculée ; le coefficient d'écoulement de cette partie de l'averse est probablement supérieur à 60 %.

La figure 6.7 présente l'hydrogramme de la crue ; la carte des isohyètes de l'averse est donnée dans la figure 6.8.

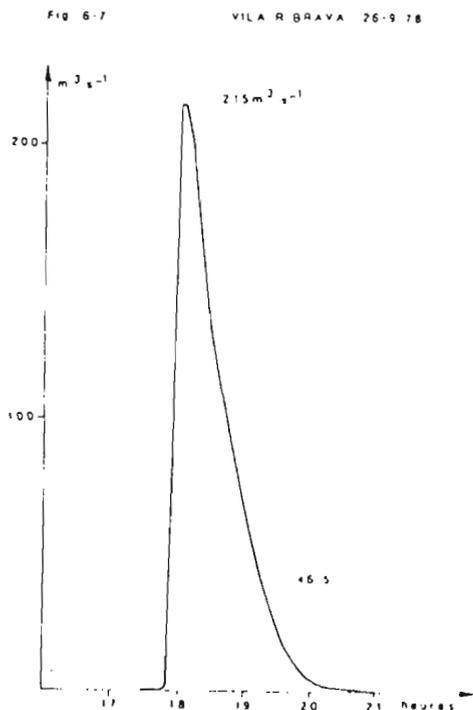
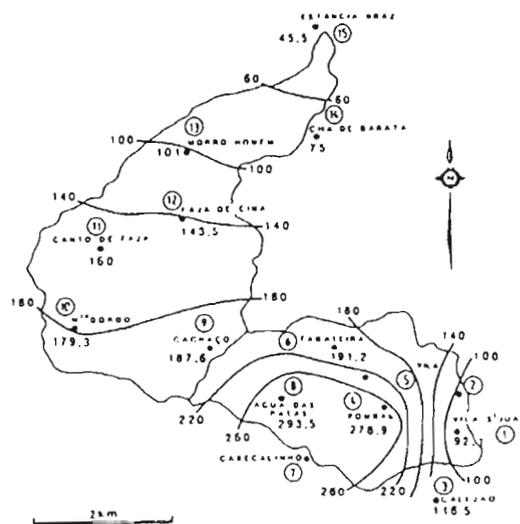


Fig 6.8 BASSINS VERSANTS DE LA RIBEIRA GRANDE ET DE LA RIBEIRA BRAVA



PLUIE DU 26 SEPTEMBRE 1978

Le caractère exceptionnel de cette crue doit être souligné ; les habitants de VILA âgés de 50 ans et plus ne se souviennent pas d'une crue aussi importante. Pourtant le professeur GOMINHO interrogé le 2 novembre 1978 par R. GALLAIRE replace l'événement décrit ici à une place relativement modeste dans le siècle. Le professeur GOMINHO né à São Nicolau en 1895 est un érudit qui a enseigné au Séminaire de VILA (1) ; il maîtrise parfaitement le français et a pu évoquer pour R. GALLAIRE les principaux événements et tendances hydro-climatiques depuis 1891.

En 1891, un cyclone se serait abattu sur l'île, occasionnant une crue énorme. A cette

(1) Ce séminaire, un des grands centres intellectuels de l'Archipel depuis deux siècles, est le plus ancien séminaire d'Afrique s.l.

époque, le lit de la Ribeira était à environ 1 m au dessous du zéro de l'échelle actuelle et malgré cela n'a pu absorber la crue. La Ribeira a envahi VILA ; des bananiers ont été retrouvés sur les marches de l'église, ce qui place le maximum à une cote supérieure à 4,5 m par rapport à l'échelle actuelle.

En septembre 1907 et 1908, à l'équinoxe, la ville est restée coupée plusieurs jours par des crues énormes.

Le professeur GOMINHO rapporte encore que de 1910 à 1915, l'eau coulait dans les ribeiras pratiquement sans interruption d'octobre à février. De 1915 à 1920, les précipitations ont été moins importantes et la tendance est à un tarissement plus rapide des ribeiras. Un nouveau cycle humide apparaît ensuite et culmine entre 1926 et 1930. En 1927, une très grosse crue est observée en septembre ; elle atteint le parapet du pont de Vila (environ 3,5 m à l'échelle). On note encore une très forte crue en 1930, puis la tendance est à une accalmie générale. De 1937 à 1939, il y a encore de l'eau dans la Ribeira plusieurs mois par an mais c'est la dernière phase hydrologique importante car la pluviométrie n'a cessé de diminuer depuis.

Dans le contexte de cet entretien, ajoutons que le Professeur GOMINHO reconnaissait que l'île a été plus boisée qu'elle ne l'est aujourd'hui mais sans que le couvert ait jamais été très important ; la couverture herbacée se serait légèrement appauvrie.

### 3.1.2. La crue du 26 septembre 1978 à Estancia Braz sur la Ribeira Grande.

La carte de la figure 6.8 présente les isohyètes du bassin de la R. Grande. Les pluies, quoique fortes, n'ont pas été aussi abondantes que sur le bassin de la R. Brava ; le maximum atteint est de 188 mm et la lame précipitée moyenne est de 141 mm.

Le hyétogramme de l'averse, obtenu à partir des enregistrements pluviographiques de FAJA da CIMA est donné dans la figure 6.9. Il montre toute une série d'averses préliminaires qui ont duré pratiquement toute la journée avec des pointes vers 8 h et 12 h dépassant 50 mm/h. A 18 h 30 une première pointe d'une dizaine de minutes atteint 50 mm/h et précède le corps important de l'averse survenant vers 19 h 30 qui totalise environ 50 mm en 40 minutes.

Fig. 6.9 Averse du 26/9/78

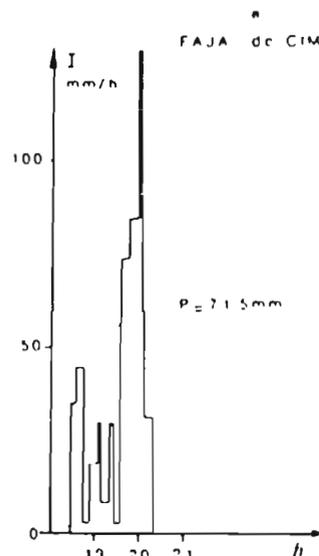
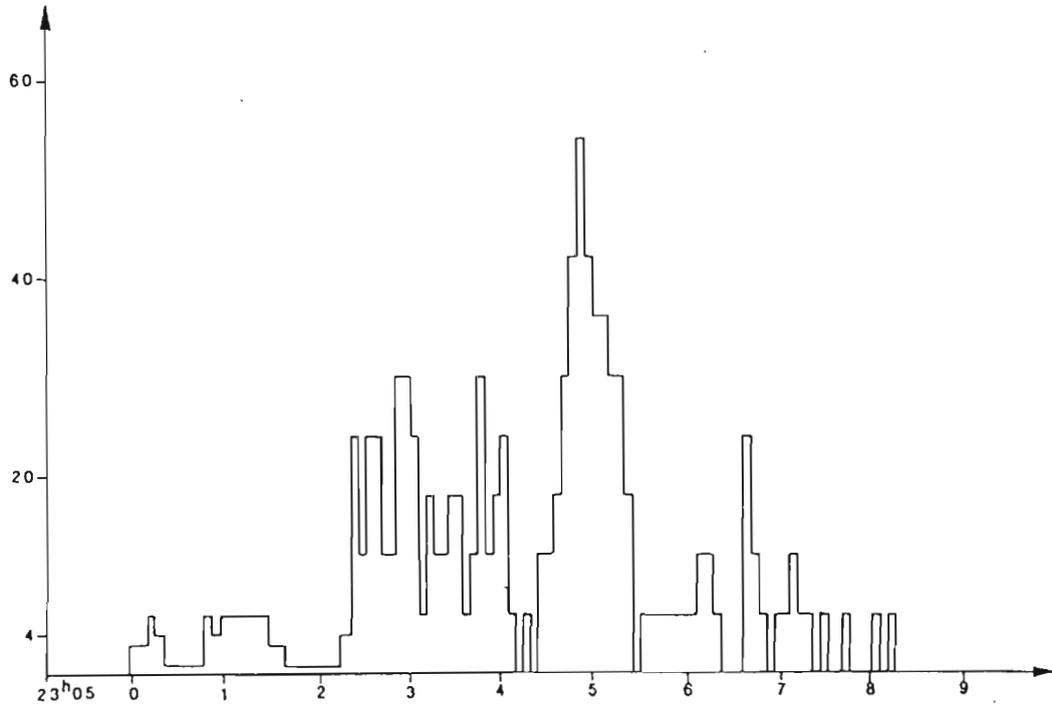




Fig. 6-12 HYETOGRAMME  
PLUIES DU 20 AU 21 JUILLET FAJA DE CIMA

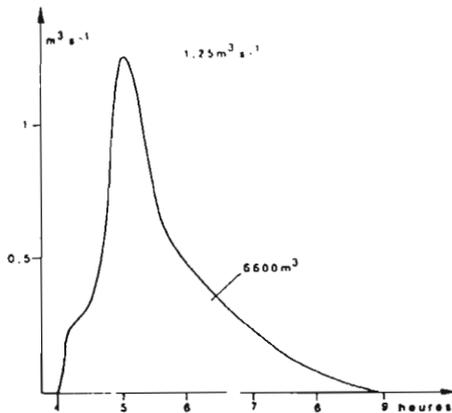


Sur la Ribeira Grande, malgré une lame précipitée moyenne de 98,5 mm aucun écoulement n'est observé. L'averse est centrée sur le haut bassin.

### 3.3. LES CRUES DU 9 SEPTEMBRE 1980

#### 3.3.1. Sur la Ribeira Brava

Fig. 6-13  
Ribeira Brava le 21 Juillet 1979



Une forte averse est reçue sur le haut du bassin. On relève 106 mm à Agua das Patas et Cabecalinho et à Cachaço 208 mm. Mais Vila n'a reçu que 36,5 mm. La lame précipitée moyenne est de 68 mm. Le hyétogramme du pluviographe hebdomadaire de TALHO présente des intensités relativement modestes sauf en début d'averse (45 mm/h pendant 10 minutes) et autour de 18 h (58 mm/h pendant 15 minutes). Ce dernier pic d'intensité est responsable du maximum principal de la crue qui atteint  $0,95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  à 9 h (soit  $142 \text{ ls}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ).

Deux points secondaires marquent la décroissance de l'hydrogramme principal. L'écoulement reste alimenté jusqu'à 24 h par la poursuite de la pluie jusqu'à 18 h environ.

Le volume écoulé est de 13 000 m<sup>3</sup> dont 10 350 m<sup>3</sup> entre 7 h et 13 h.

La lame écoulée est de 1,94 mm soit un coefficient d'écoulement de 2,85 %.

Les figures 6.14 et 6.15 illustrent les différentes caractéristiques de cet épisode hydropluviométrique.

Fig. 6-16 RIBEIRA BRAVA le 9 septembre 1980

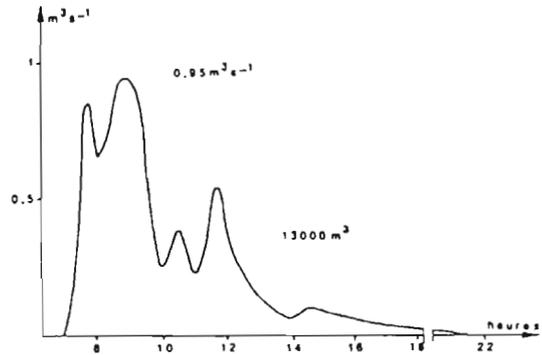


Fig 6-17 FAJA Averse du 9 septembre 1980

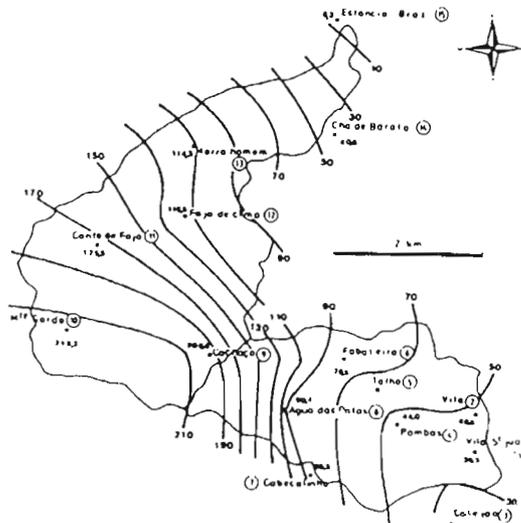
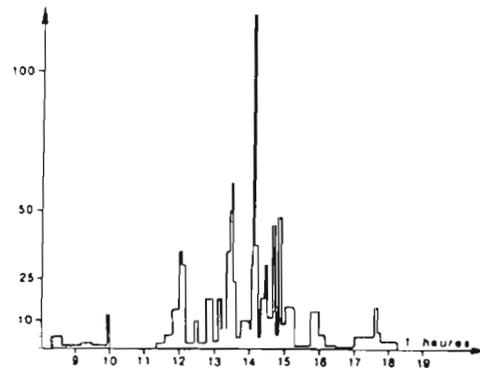
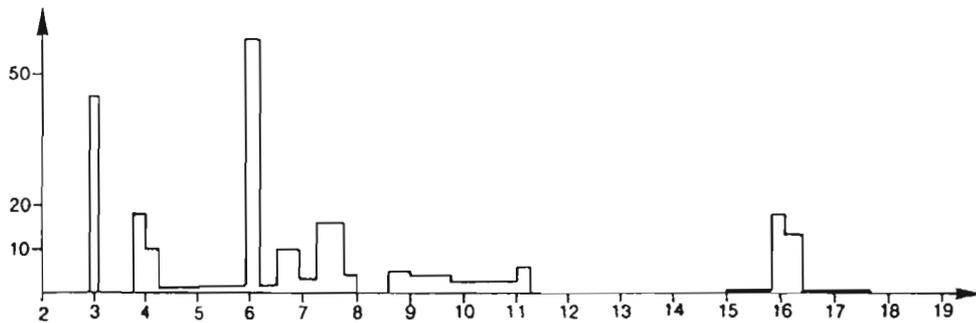


Fig 6-14  
PLUIE DU 9 SEPTEMBRE 1980

Fig. 6-15 TALHO Averse du 9 septembre 1980



### 3.3.2. Sur la Ribeira Grande

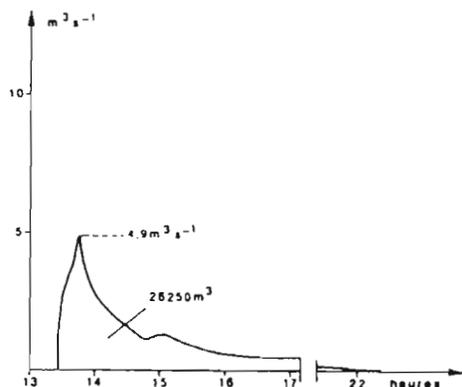
La pluie du 9 septembre 1980 est centrée sur le haut bassin avec une hauteur maximale relevée au Monte Gordo avec 218,2 mm ; on relève seulement 8,3 mm à Estancia Braz. La hauteur moyenne des pluies est de 144 mm.

Le début de l'écoulement est relevé à 13 h 25. Le maximum de la crue est observé à 13 h 40 (temps de montée : 15 mn) avec un débit de  $4,9 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  soit un débit spécifique de  $445 \text{ l/s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ . Une lente décrue s'amorce avec un léger sursaut autour de  $1,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  vers 15 heures. L'écoulement se maintient entre 16 h et 22 h entre 500 et quelques litres par seconde seulement et correspond à l'évacuation des pluies consécutives à l'averse principale.

Le volume écoulé est de  $26\,250 \text{ m}^3$ , soit une lame écoulée de 2,39 mm et un coefficient d'écoulement de 1,66 % (cf. figure 6.18)

Fig 6-18

RIBEIRA GRANDE Crue du 9 septembre 1980



### 3.4. LES CRUES DU 2 SEPTEMBRE 1981

#### 3.4.1. A Vila da Ribeira Brava

Le pluviogramme enregistré à Talho indique un début des précipitations vers 2 h du matin avec de très faibles intensités jusqu'à 6 h ; de 6 h à 6 h 30 un orage violent s'abat sur le bassin avec une intensité moyenne de  $108 \text{ mm/h}$  soit une lame d'eau ponctuelle de 54 mm. Une traine de 13 mm suivra ce pic d'intensité jusqu'à 9 h. L'averse est centrée sur TALHO (80,0 mm) et le versant nord et aval de la Ribeira Brava (plus imperméable). La pluie moyenne n'est que de 56 mm.

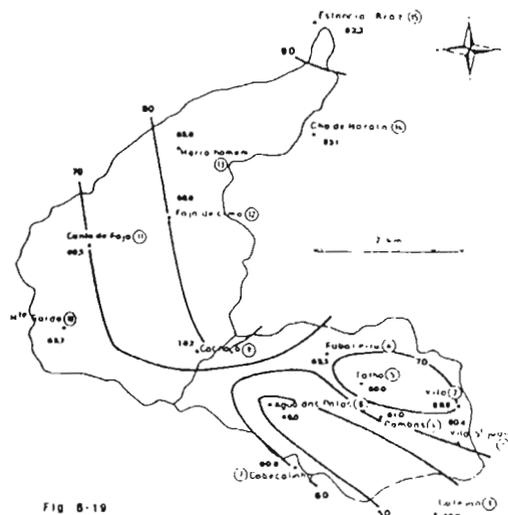
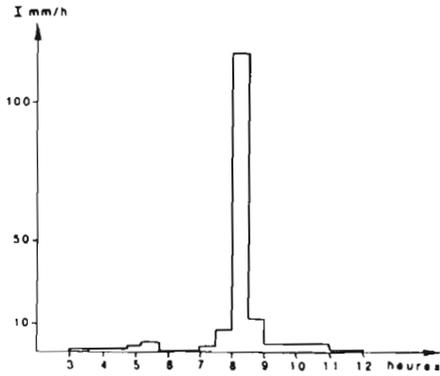


Fig 6-19

PLUIE DU 2 SEPTEMBRE 1981

L'écoulement débute vers 8 h 50. Le maximum de la crue est atteint à 9 h 20 (temps de montée : 30 mn) à  $86,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  soit un débit spécifique de  $12\,900 \text{ l/s}^{-1} \text{ km}^2$ . La décrue est rapide et l'écoulement de crue laisse la place à un écoulement résiduel à partir de 10 h qui se poursuivra jusqu'à 12 h 30. Le temps de

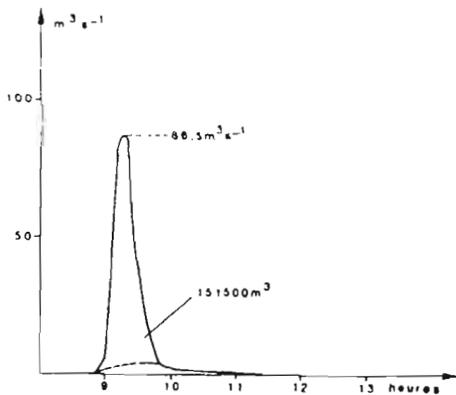
Fig. 6-20 TALHO Averse du 02/09/1961



base t de l'hydrogramme de pointe de crue est de 1 h environ, l'écoulement ayant duré au total 3 h 40.

Le volume total écoulé est de 151 500 m<sup>3</sup>, soit une lame écoulée de 22,6 mn et un coefficient d'écoulement de 40,4 %.

Fig. 6-21 RIBEIRA BRAVA Crue du 2 septembre 1961



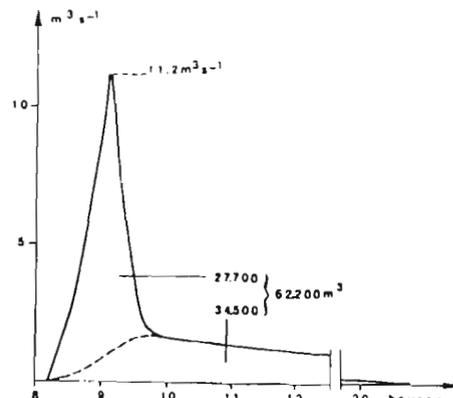
### 3.4.2. Sur la Ribeira Grande

L'averse est centrée sur l'exutoire avec 92,2 mm à Estancia Braz pour seulement 65,7 mm au Monte Gordo. La pluie moyenne est de 77 mm.

La crue s'amorce à 8 h 10 par une montée régulière pour atteindre son sommet à 11,2 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> soit 1020 ls<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup> à 9 h 05 (temps de montée : 55 mn). Après une décrue rapide jusqu'à 10 h et un débit de 1,5 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> l'écoulement se poursuit dans la Ribeira jusqu'à 21 h. Le temps de base de la pointe de crue est d'environ 2 heures ; l'ensemble de l'écoulement dure environ 11 heures.

Le volume total écoulé est de 62 200 m<sup>3</sup>, soit une lame écoulée de 5,65 mm et un coefficient d'écoulement de 7,34 %. Il faut souligner ici la forme particulière de l'hydrogramme limitant la pointe de crue à un volume de 28000 m<sup>3</sup> lorsque le volume de l'écoulement retardé atteint 34200 m<sup>3</sup>. Ceci indique l'importance dans la partie aval du bassin d'écoulements de type karstique dans les coulées basaltiques récentes.

Fig. 6-22 RIBEIRA GRANDE Crue du 2 septembre 1961





La décrue est rapide ; à 15 h, il n'y a plus que  $53 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  et à 16 h,  $7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . L'écoulement se poursuit jusqu'à 23 heures où il n'intéresse plus que quelques litres par seconde.

Le volume total écoulé est de  $524\,000 \text{ m}^3$ , ce qui correspond à une lame écoulée de  $73,8 \text{ mm}$  et à un coefficient d'écoulement de  $61 \%$ .

Si l'on s'en tient à la crue principale et à la pointe d'intensité correspondante supposée représentative de tout le bassin, on peut proposer l'estimation suivante :

- soit le rapport  $P_{mm}/p_{TALHO} = 0,72$   
 et la pointe d'intensité totalisant à TALHO  $88 \text{ mm}$ , ou aurait eu sur le bassin  $88 \times 0,72 = 63 \text{ mm}$  reçus dans des conditions exceptionnelles de saturation des sols. L'hydrogramme correspondant à un volume de  $378\,000 \text{ m}^3$  soit  $56 \text{ mm}$  et un coefficient possible de  $90 \%$  sur ces terrains volcaniques anciens particulièrement imperméables.

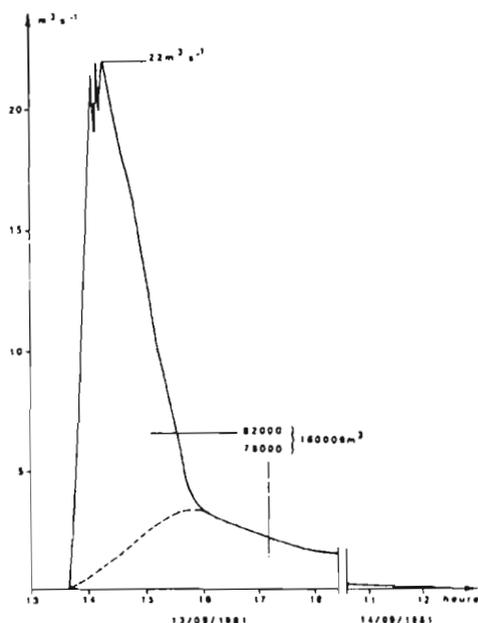
### 3.5.2. sur la Ribeira Grande

L'averse est centrée sur les postes de FAJA et du MORRE HOMEN qui reçoit le 13 septembre  $155 \text{ mm}$ . Le plus fort des précipitations se situe au centre et dans la moitié aval du bassin. La pluie moyenne est de  $110 \text{ mm}$ .

A la station d'Estancia Braz, l'écoulement commence à 13 h 40. Le temps de montée est très rapide (25 minutes) et un premier maximum est atteint à 14 h 05 à  $21,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Deux pointes équivalentes succèdent à la première avec un débit de  $22 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  à 14 h 20

(débit spécifique de  $2000 \text{ l.s}^{-1}.\text{Km}^{-2}$ ). La décrue s'amorce immédiatement après et l'hydrogramme de pointe que l'on peut assimiler à un hydrogramme de ruissellement pur s'achève à 15 h 40. Son temps de base serait donc de 2 heures. L'écoulement se poursuit pendant une douzaine d'heures entre  $3,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  et quelques litres par seconde. Il correspond aux apports retardés par un écoulement de type karstique dans les coulées basaltiques récentes (fig. 6.26).

Fig. 6-26  
 RIBEIRA GRANDE Crue du 13 septembre 1981



Le volume global écoulé est de  $160\,000 \text{ m}^3$ , soit une lame écoulée de  $15,7 \text{ mm}$  et un coefficient d'écoulement de  $14,3 \%$ , soit le plus fort coefficient que nous ayons observé sur ce bassin.

L'hydrogramme de la pointe de crue concerne  $82\,000 \text{ m}^3$  et l'écoulement retardé se rapporte à un volume de  $78\,000 \text{ m}^3$ . Comme pour la

crue du 2 septembre 1981 (et aussi celle du 9 septembre 1980), les deux types de réaction du bassin semblent concerner des volumes pratiquement équivalents. L'écoulement retardé pourrait être relativement plus important que le ruissellement direct lorsque l'averse est plus centrée sur la partie aval du bassin avec ses grands champs de lave qui favorisent l'infiltration et le cheminement des eaux par les nombreuses fissures du matériau.

### 3.6. LA CRUE DU 29 AOUT 1982 A VILA DA R. BRAVA

Une pluie relativement modeste est observée sur le bassin de la Ribeira Brava. La pluie moyenne n'est que de 39 mm avec une pointe d'intensité de 86 mm/h pendant 20 minutes, mais seulement 22 mm/h à Cachaço. La crue observée n'a pas dépassé le maximum de

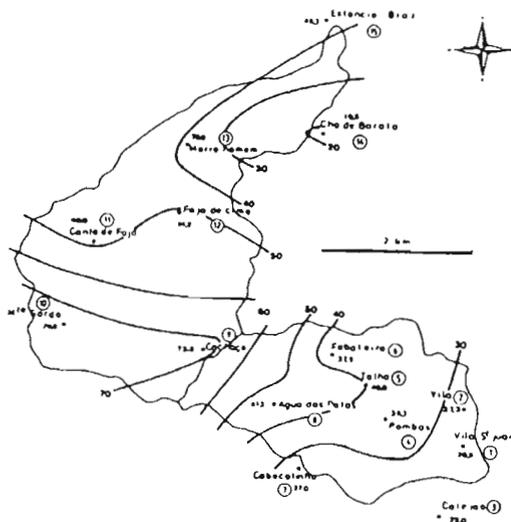
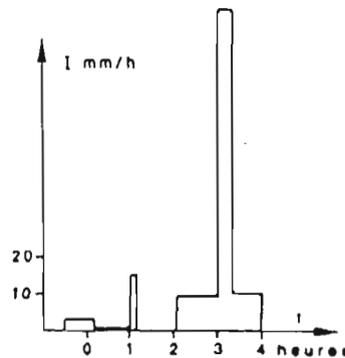


Fig. 8-27  
PLUIE DU 29 AOUT 1982

$250 \text{ l.s}^{-1}$ , l'écoulement a duré 2 h 15 environ et le volume écoulé est de  $1000 \text{ m}^3$  soit une lame écoulée de 0,15 mm et un coefficient d'écoulement de 0,4 %. Il s'agit très proba-

blement d'une réaction locale du bassin présentant relativement peu d'intérêt dans l'étude menée ici (fig. 6.27 et 6.28).

Fig. 8-28  
TALHO (R. BRAVA) Averse du 29 août 1982



Aucun écoulement n'est observé sur la R. GRANDE dont le bassin a pourtant reçu une pluie moyenne de 59 mm.

### 3.7. LA CRUE DU 1er OCTOBRE 1983 SUR LA RIBEIRA GRANDE

L'averse du 1er octobre 1983, pratiquement pas perçue sur le bassin de la Ribeira, est centrée sur la partie aval du bassin avec un maximum de 93,5 mm à Cha de Barata. La pluie moyenne est de 42,9 mm (fig. 6.29).

L'écoulement observé à Estancia Braz a une durée totale d'1 h 20 ; il provient de toute évidence des tributaires aval du bassin. On relève quatre pointes dont la plus forte atteint un maximum de  $3,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (soit  $320 \text{ l.s}^{-1}\text{.km}^{-2}$ ).

Le volume écoulé est de  $6000 \text{ m}^3$ , soit une lame écoulée de 0,55 mm et un coefficient d'écoulement de 1,29 % (fig. 6.30).



Fig. 6-31. CARACTERISTIQUES DES CRUES OBSERVEES SUR LES BASSINS

	R. BRAVA			R. GRANDE			
	Lame mm	Ke%	Vol.10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	Lame mm	Ke%	Vol.10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	
26/9/78	240		1608	141		1551	P
		43.4	910		4.97	1474	St
	104.1		698	7.01		77.1	Ec
21/7/79	86.5		580	98.5		1084	P
		1.14	573		0	1084	St
	0.99		6.6	0		0	Ec
9/9/80	68		456	144		1584	P
		2.85	443		1.66	1558	St
	1.94		13	2.39		26	Ec
2/9/81	56		375	77		848	P
		40.4	224		7.34	786	St
	22.6		151	5.65		62	Ec
13/9/81	128		858	110		1121	P
		61	334		14.3	961	St
	73.8		524	15.7		160	Ec
29/8/82	39		261	59			
		0.38	260		0		
	0.15		1.0	0		0	
1/10/83	1.5		0	42.9		472	P
		0			1.29	466	St
	0		0	0.55		6	Ec

P; précipitation moyenne - St; stock pour infiltration - Ec : écoulement de crue et évaporation

### 3.8. LES PRINCIPAUX EVENEMENTS PLUVIOMETRIQUES N'AYANT PAS ENTRAINE D'ECOULEMENT

- En 1978, les pluies de la fin août sont très insuffisantes en volume comme en intensité pour susciter un ruissellement, tant sur la R. Brava que sur la R. Grande. Les averses d'octobre notamment le 14 avec 67,4 mm au Monte Gordo n'ont pas d'intensité maximale supérieure à 30 mm/h et aucun écoulement n'est observé sur la R. Grande.
- En 1979, on doit encore souligner l'absence d'écoulement sur la R. Grande malgré une pluie moyenne voisine de 100 mm, mais une intensité maximale de 54 mm/h. La pluie du 21 octobre, pourtant centrée sur la zone FAJA - MORRE HOMEN avec 96 mm ne provoque aucune réaction

de la R. Grande, pas plus que sur la R. Brava qui ne reçoit que 35 mm de pluie moyenne. Les intensités n'ont jamais dépassé 12 mm/h.

- En 1980, la pluie du 30 juillet reste modeste (20 mm sur R. Brava, 25 mm sur R. Grande) et il n'y a pas d'écoulement. Le 14 août, les pluies sont plus importantes (55 mm sur R. Grande et 40 mm sur R. Brava) mais centrées sur les hauts bassins, sans réaction des Ribeiras. L'intensité maximale est de 16 mm/h en 30 minutes.

Le même scénario se reproduit le 23 août 1980.

- En 1981, la pluie du 4 août est en moyenne de 56,2 mm sur la R. Grande et de 28,2 mm sur la R. Brava. Aucun écoulement n'est observé ; là encore l'averse est centrée sur le haut des bassins.

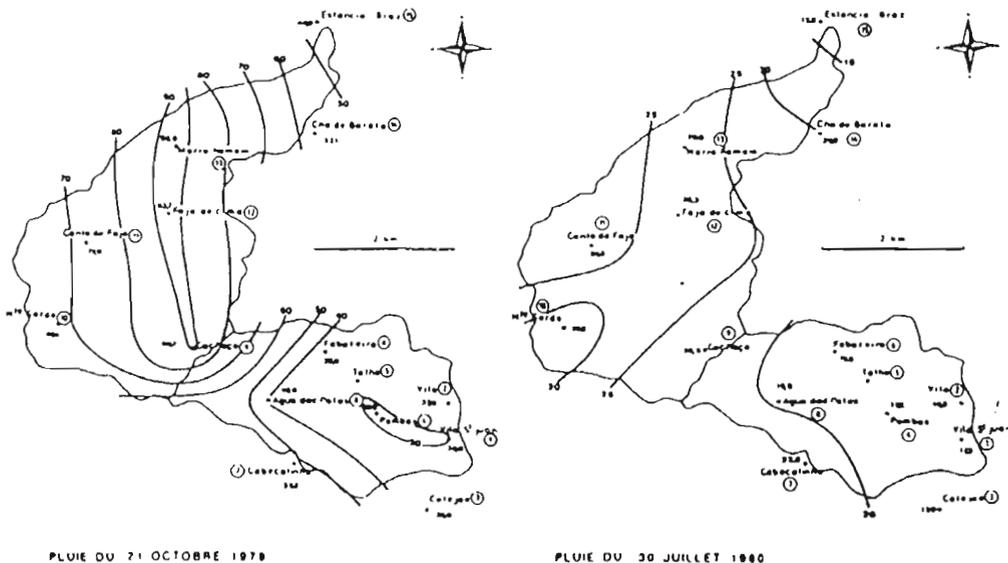


Fig 8-32 Averses n'ayant pas ruisselé

- En 1982, rappelons la seule pluie notable du 29 août qui a donné le très faible écoulement de VILA et aucun écoulement sur la R. GRANDE, malgré une pluie moyenne de 59 mm. Les intensités sont restées inférieures à 12 mm/h à FAJA, à 22 mm/h à Cachaço.

- En 1983, la pluie du 12-13 septembre mérite à peine d'être signalée ; malgré environ 30 mm précipités près de l'exutoire, aucun écoulement n'est relevé à Estancia Braz sur la R. Grande.

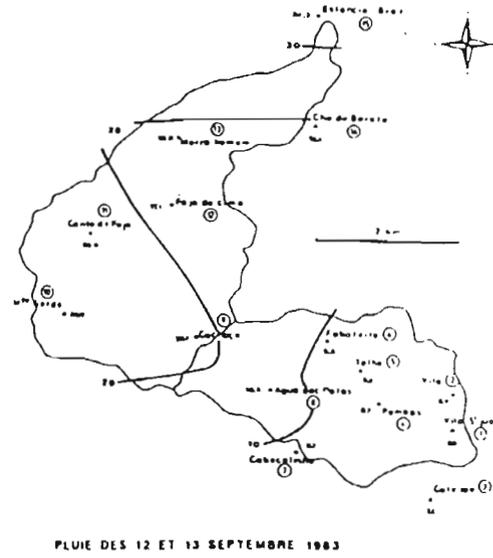
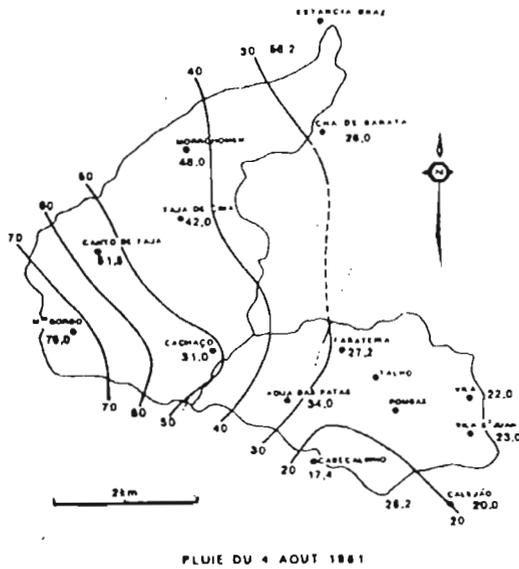
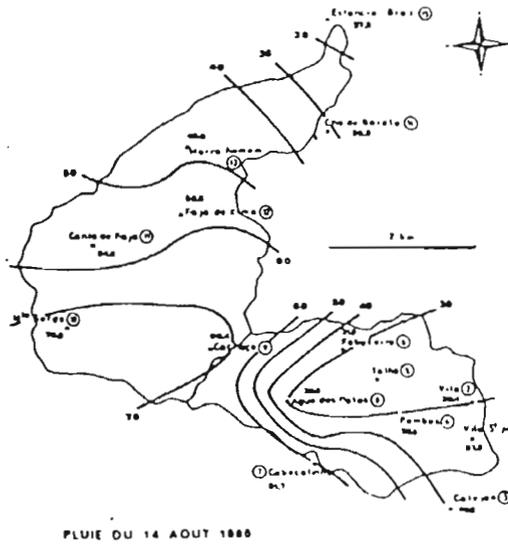


Fig. 6-32 e Averages n'ayant pas été relevés



Page précédente :

- 1 : Arrivée de la crue du 2/9/81 dans la Ribeira Brava à sec, en aval de Vila.
- 2 : Cheminement de la crue du 2/9/81 dans la vallée de R. Brava.
- 3 : Phase préliminaire de l'écoulement à Vila da R. Brava.  
(Photos P. Legal).

Page ci-contre    1 2 :  
   3

- 1 : Restes de l'inondation dans les bas-fonds de la R. Brava après la crue du 2/9/81.
- 2 : Cascade et écoulement dans une petite ribeira près de Carvoeiros.  
(Photos P. Legal).
- 3 : Orage sur le haut bassin en amont de Vila.  
(Photo J. Lérique).



Page ci-contre :

- 1 - Ruissellement diffus à Estancia Braz sur coulées volcaniques scoriacées le 13/9/81.
- 2 - la Ribeira Grande en crue le 13/9/81 au fond du petit canyon d'Estancia Braz.
- 3 - Ecoulement d'une petite ribeira sur la route entre Carvoeiros et Vila ; les blocs éboulés et charriés ont coupé la route.  
(Photos P. Legal).

Page suivante (p. 262)

La station d'Estancia Braz sur la R. Grande en crue (13/9/81). On distingue le flot boueux au milieu des rochers sur la droite.  
(Photo Legal).





## 4. ANALYSE DES RESULTATS

### 4.1. LES CONDITIONS DE GENESE DES CRUES

L'échantillon d'événements hydropluviométriques, dont nous disposons ne permet pas une analyse très poussée sur la genèse des crues.

Plusieurs remarques permettent cependant d'orienter cette analyse :

- 1) Les conditions du ruissellement diffèrent considérablement du bassin de la Ribeira Brava au bassin de la Ribeira Grande : plus que les facteurs de pente, c'est la nature géologique du substratum qui apparaît comme le facteur essentiel de cette opposition entre les deux bassins.
- 2) L'existence de deux familles de précipitations apparaît comme déterminante dans l'apparition ou non d'écoulements sur les deux bassins ; les pluies prolongées de type mousson océanique ne provoquent aucune réaction d'écoulement superficiel même si les hauteurs de précipitations sont importantes ; les pluies violentes, brèves dans le temps, de type orage, grain, ou "tornado" pour reprendre un terme improprement utilisé sur le continent africain, sont à l'origine des crues observées à partir d'un certain seuil de hauteurs de précipitations.

- 3) Le rôle joué par l'état antérieur du sol sur le plan de son humidité, traduit généralement par un indice d'humidité du type KOLHER, n'apparaît pas vraiment dans l'échantillon étudié ; ceci ne signifie pas que ce paramètre ne soit pas important ; on peut cependant relever qu'à São Nicolau les jours de pluie ne sont pas très nombreux (le calcul des pluies antérieures à l'averse génératrice d'une crue est souvent vite fait), mais que les hauteurs de pluie sont assez importantes pour amener une rapide "saturation" des horizons superficiels ; on se retrouve alors dans des conditions d'indice d'humidité optimales pour le ruissellement.

- 4) Lorsque les averses sont centrées sur le centre ou l'aval du bassin les crues paraissent plus puissantes. A précipitation "limite" égale, il y aura crue ou non suivant que l'averse est centrée sur l'aval ou l'amont du bassin.

Il s'agit encore là d'un facteur limitant à l'apparition des crues puisque nos études de gradient pluviométrique laissent supposer des précipitations généralement plus fortes vers l'amont.

#### 4.1.1. Analyse des crues de la Ribeira Brava à Vila

L'analyse globale faite sur les six événements qui ont été observés permet de proposer quelques résultats sur les lames écoulées et les maximums de crue. On identifie deux familles de crue directement liées à l'intensité maxima-

le (calculée ici sur trente minutes).

Seules les pluies ayant des intensités supérieures à  $100 \text{ mm/h}^{-1}$  pour des hauteurs de précipitations suffisantes sont à l'origine des fortes crues.

Les petites crues naîtraient d'averses suffisamment importantes dont les intensités maximales seraient comprises entre  $50$  et  $100 \text{ mm/h}^{-1}$ .

Pour des intensités inférieures à  $50 \text{ mm/h}^{-1}$ , il n'y aurait pas genèse de crues.

La figure 6.33 illustre l'ébauche d'une relation entre la pluie moyenne  $P$  reçue par le bassin et la lame écoulée  $He$  en mm.

### BASSIN DE LA RIBEIRA BRAVA

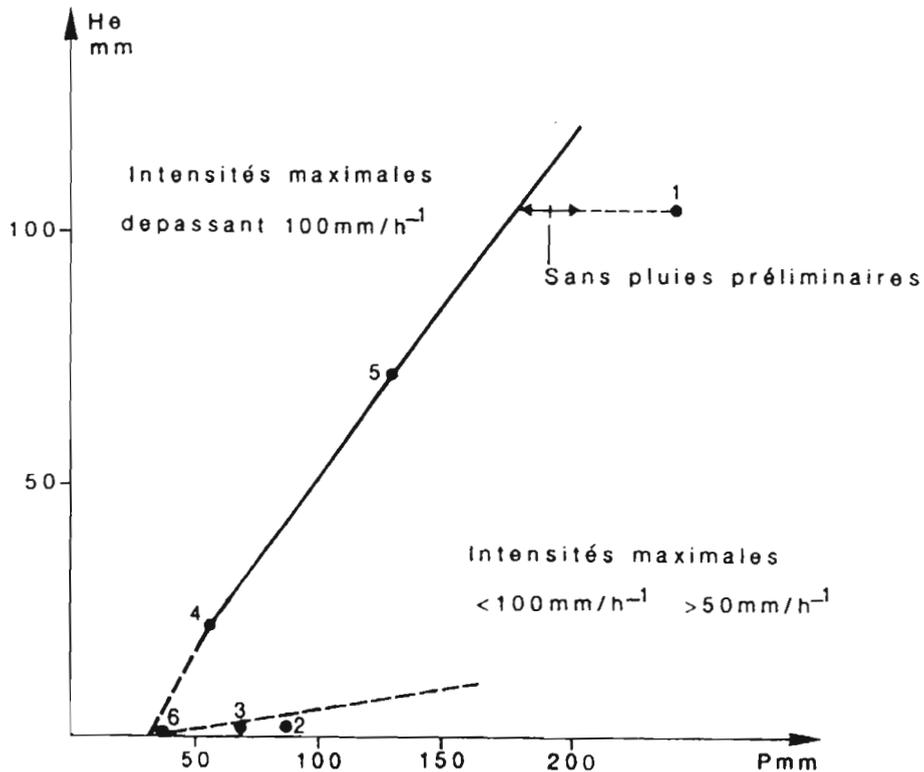


Fig. 6-33 Ecoulements et hauteurs de pluie

On relèvera que la crue n° 6 (29 août 82) doit probablement son existence, pour une aussi faible précipitation totale, à un centrage de l'averse sur l'aval du bassin et à une intensité maximale atteignant 86 mm h<sup>-1</sup>. Le centrage de l'averse sur l'aval explique aussi l'importance relative de la crue 4 (2 septembre 81). Les crues 2 et 3 illustrent ce qui a été dit sur les faibles crues d'intensités à peine supérieures à 50 mm/h<sup>-1</sup>, et de précipitations centrées sur le haut bassin.

Les crues 4 et 5 ont servi à appuyer une courbe donnant He en fonction de la pluie moyenne reçue par le bassin P dans des conditions optimales d'écoulement (intensités maximales dépassant 100 mm/h<sup>-1</sup> pendant trente minutes).

La crue 1 (26 septembre 78) est censée s'appuyer sur cette courbe si on enlève au total pluviométrique une estimation des averses préliminaires de la journée (60 mn environ).

La relation s'écrirait :

pour  $P > 50$  mm et  $I > 100$  mm h<sup>-1</sup>

$$He = 0,68P - 15$$

Cette relation pourrait être utilisée dans la gamme de précipitations de 50 à 200 mm. Elle suppose un coefficient d'écoulement de 53 % pour 100 mm, de 58 % pour 150 mm et de 60,5 % pour 200 mm.

La figure 6.34 donne les débits maximums de crue en fonction de la pluie moyenne reçue par le bassin. Une échelle logarithmique des débits a été utilisée pour distinguer les maximums des petites crues. En surimposition, les débits des trois plus fortes crues ont été rappelés en coordonnées arithmétiques.

La relation pourrait être pratiquement linéaire si on ramenait la pluie du 26 septembre 78 à son corps principal (de 180 à 200 mm ?). Dans ce cas une relation peut être écrite :

$$Q_{max} = 0,85 P + 45$$

Dans tout ce qui précède, on a bien montré que le facteur principal de l'apparition et de l'importance des crues tenait dans l'intensité de l'averse, traduite ici par l'intensité maximale mesurée en trente minutes. La figure 6.35 illustre donc une relation entre He et I<sub>max</sub>. La forme de la courbe pour les plus fortes intensités tient aux limites de la hauteur de précipitations tombée en une 1/2 heure.

Les écarts à la courbe ainsi tracée se corrigent par la hauteur de précipitations moyennes reçue par le bassin P qui apparaît ici comme un facteur secondaire. L'utilisation d'une telle relation pourrait être intéressante si les chroniques pluviométriques comportaient aussi les chroniques d'intensités ... Ce n'est malheureusement pas le cas, et plus loin les estimations qui seront faites sur la base des figures 6.33 et 6.34 tiendront le facteur intensité pour maximal.

RIBEIRA BRAVA

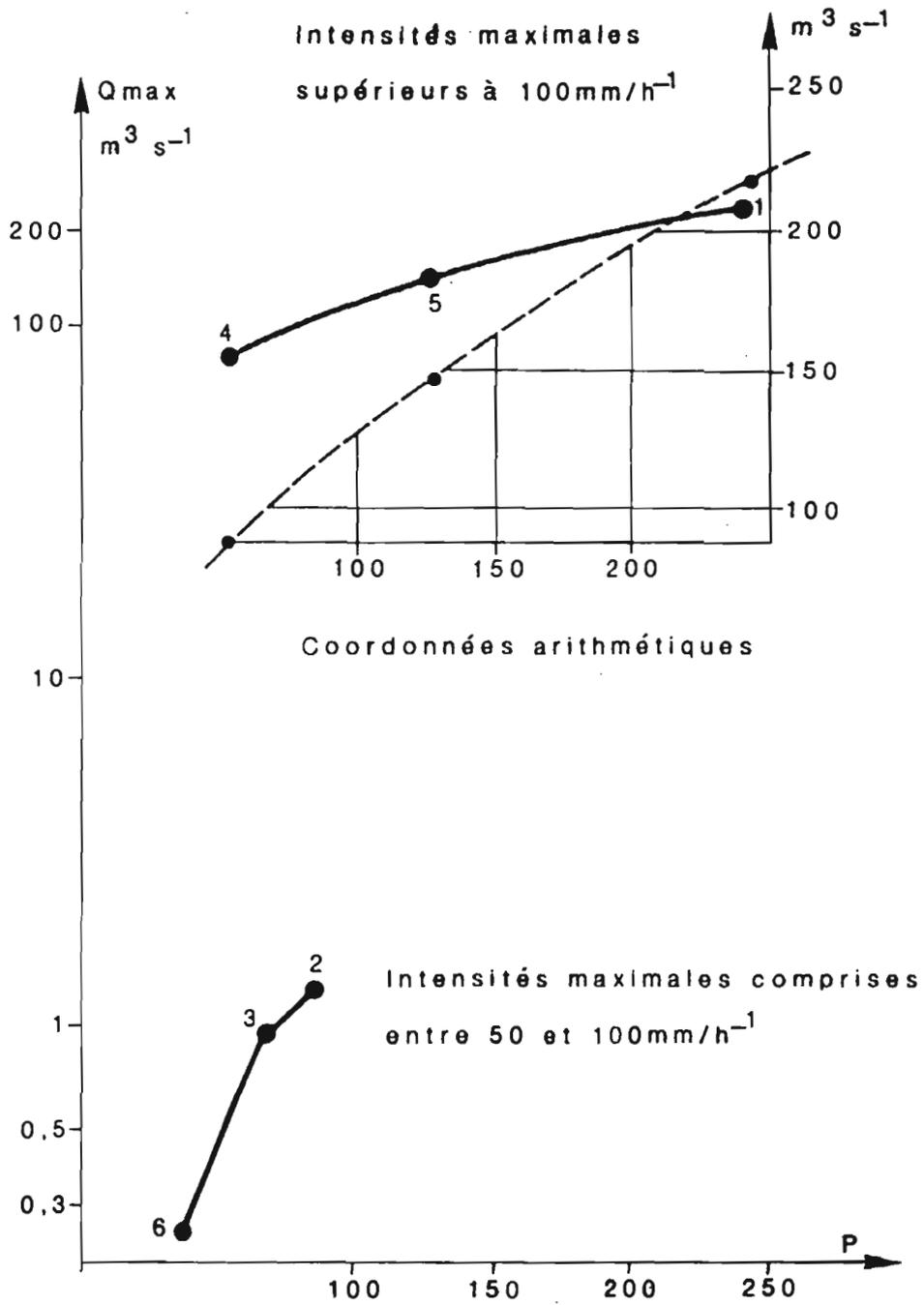


Fig. 6-34: Maximum de crue et hauteur de précipitation

BASSIN DE LA RIBEIRA BRAVA

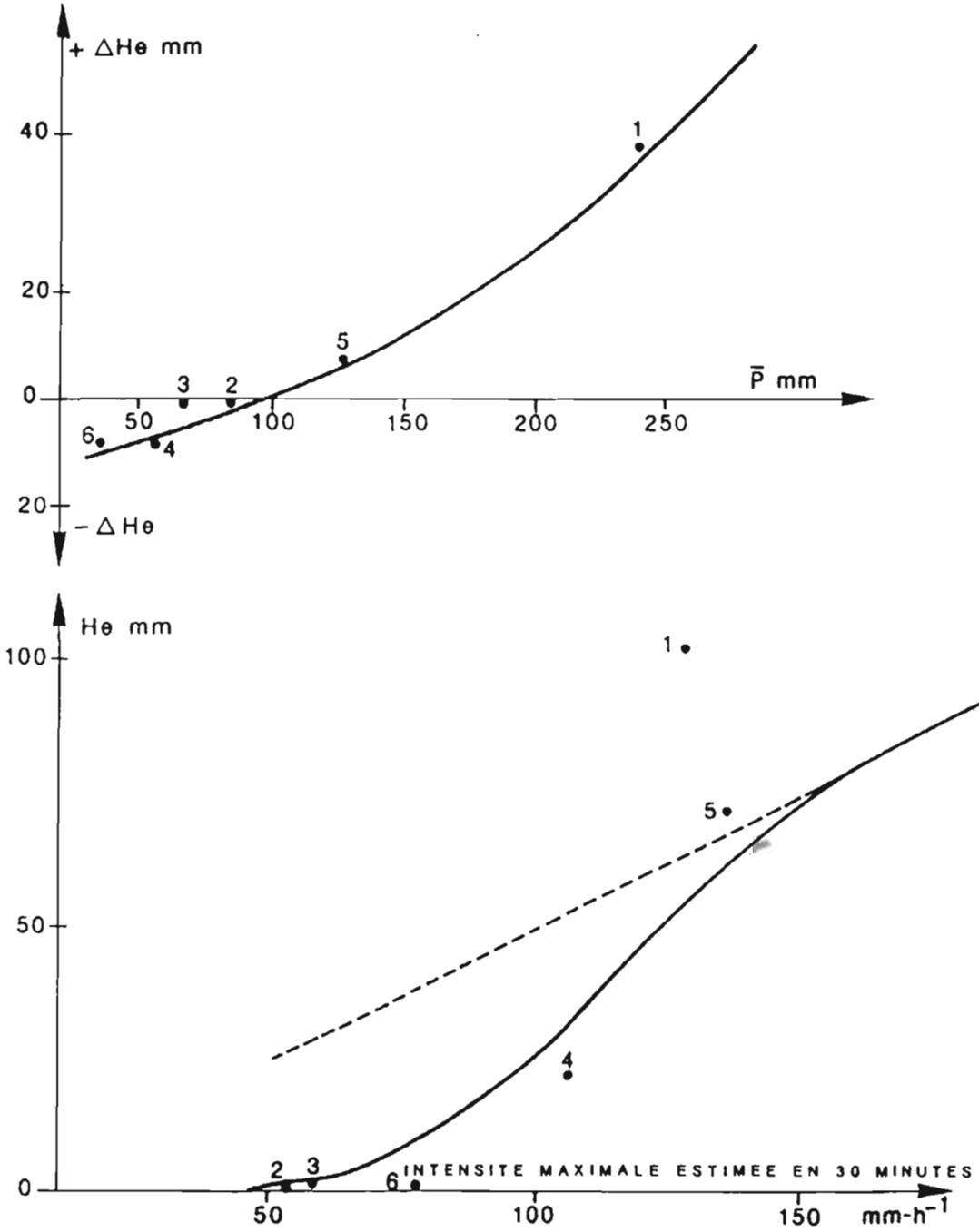


Fig. 6-35 : Ecoulement et intensité des averses

#### 4.1.2. Analyses des crues de la Ribeira Grande à Estancia Braz

On dispose de cinq événements qui permettent de retrouver l'essentiel de ce qui a été dit précédemment. Mais toutes choses égales par ailleurs, l'écoulement est beaucoup plus faible sur la Ribeira Grande que sur la Ribeira Brava.

L'étude de relations entre la lame écoulée  $H_e$  et la pluviométrie moyenne reçue par le bassin montre l'incidence majeure de l'intensité maximale de précipitations mais aussi celle du centrage de l'averse.

Dans la figure 6.36 on relève ainsi les crues 3, 4 et 5 pour lesquelles les intensités maximales de la pluie ont dépassé  $100 \text{ mm/h}^{-1}$  et dont les averses sont centrées sur l'aval du bassin. Ces trois événements semblent orienter une relation de l'écoulement en fonction de la pluie reçue par le bassin dans des conditions optimales d'intensité et de centrage de l'averse. Celle-ci pourrait s'écrire (en mm) :

$$H_e = 0,25 P - 12$$

Elle semble pouvoir être utilisée entre 50 et 150 mm, peut-être 200 mm de pluie.

Elle indique dans ces meilleures conditions d'écoulement, un coefficient d'écoulement de 13 % pour 100 mm, 17 % pour 150 mm et 19 % pour 200 mm, soit des valeurs de trois à quatre fois inférieures à celles de la Ribeira Brava.

En complément de ces commentaires sur la figure 6.36, mentionnons le faible écoulement relatif de la crue 1 (averse centrée sur l'amont du bassin et pourtant forte intensité) et les pluies moyennes entre 50 et 100 mm indiquées sans écoulement (faibles intensités).

Dans un deuxième graphe (figure 6.37), mettant en relation les débits maximums et la pluie moyenne du bassin en coordonnées semi logarithmiques, on peut déduire de la courbe induite par les crues 3, 4 et 5 un débit maximum probable :

de  $19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour  $P = 100 \text{ mm}$

de  $42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour  $P = 150 \text{ mm}$

de  $55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour  $P = 200 \text{ mm}$

#### 4.2. PREDETERMINATION DE CRUES - CALCUL DE LA CRUE DECENNALE

Si l'on s'en tient aux relations établies -dont on doit souligner le caractère très schématique et dont l'utilisation suppose une grande prudence- les maximums de crue des deux bassins peuvent être comparés pour différentes hauteurs de précipitations en ramenant les valeurs à des débits spécifiques en  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ .

Tableau 6.8 : ( $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ )

P mm	R Brava	R Grande
60	13400	640
100	19000	1750
150	24500	3800
200	29000	5000

Fig. 6-36 RIBEIRA GRANDE (Ecoulement et pluie)

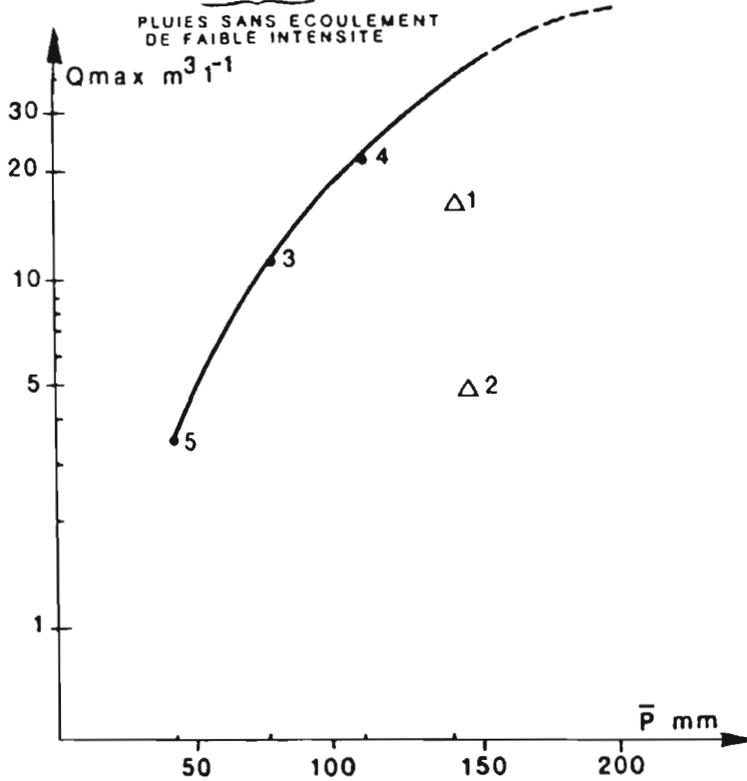
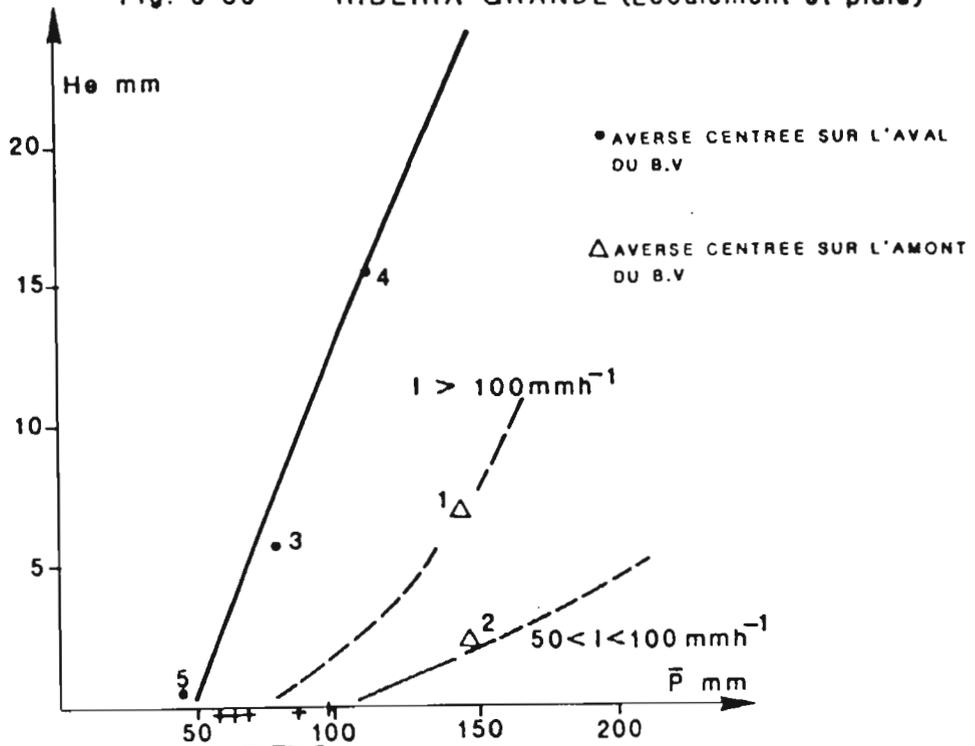


Fig. 6-37 Maximum de crue et hauteur de pluie

La démarche "traditionnelle" qui préside à une prédétermination de crues de récurrences données, consiste, en l'absence d'un échantillon d'événements qui pourrait être traité directement sur le plan statistique, à considérer qu'une pluie de récurrence connue génère une crue de même récurrence.

Cela nous ramène donc à l'étude statistique des pluies journalières du chapitre III ; cette étude avait permis de retenir les valeurs suivantes :

averse de fréquence annuelle : 60 mm  
 averse de fréquence décennale : 160 mm  
 averse de fréquence vicennale : 200 mm  
 averse de fréquence centennale : 260 mm

Pour fixer un ordre d'idée sur l'importance d'un risque "crue", les projeteurs et hydrologues ont convenu de retenir, comme valeurs repères, les paramètres de la crue décennale, et en particulier trois valeurs principales : le volume de la crue, son temps de base et son maximum.

La crue décennale serait donc par définition générée par une pluie décennale. Celle-ci correspond ponctuellement à une pluie maximale de 160 mm. Pour connaître la pluie moyenne sur le bassin, il faut lui appliquer un coefficient d'abattement. Pour Vuillaume (1974) ce coefficient varie de 0,89 à 0,84 pour des bassins de cette superficie. Quatre observations effectuées conduisent en fait à réduire ces coefficients (effets orographiques importants). On a retenu :

- pour la Ribeira Brava  
 $K = 0,85$  et  $P$  décennale = 136 mm  
 - pour la Ribeira Grande  
 $K = 0,80$  et  $P$  décennale = 128 mm

Une hypothèse supplémentaire doit être introduite ; il faut en effet admettre que cette averse est tombée avec des intensités supérieures à  $100 \text{ mm h}^{-1}$  en 30 minutes pour appliquer les relations proposées plus haut.

On a alors :

Tableau 6.9 : Caractéristiques de la crue décennale

	Ribeira Brava 6,7 km <sup>2</sup>	Ribeira Grande 11 km <sup>2</sup>
Pluie moyenne mm	136	128
He mm	78	20
Ke %	57	15.6
Volume m <sup>3</sup>	522 600	220 000
Q max m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	145	30
Q spécifique ls·1km <sup>-2</sup>	21 600	2 725

Pour les débits maximums, une autre approche est généralement retenue qui consiste à tenir compte de la forme de l'hydrogramme et du temps de base.

Les hydrogrammes présentés précédemment montrent pour les événements importants des pointes de crue bien individualisées, dont les temps de base sont :

- de 2 H le 26 septembre 1978, 1 H le 2 septembre 1981 et 1 H 30 le 13 septembre 1981 sur la Ribeira Brava (Ajoutons que le rapport entre volume de l'hydrogramme de pointe et le volume total varie de 0,76 à 0,9. La valeur moyenne qui peut être retenue est de 0,8.
- de 1 H 30 le 9 septembre 1980, 1 H 45 le 2 septembre 1981 et 2 H le 13 septembre

1981 sur la Ribeira Grande (de plus pour cette rivière, le volume de la pointe de crue est pratiquement identique au volume retardé et représente donc la moitié du volume total de la crue).

Ces temps de base ont permis de calculer les débits moyens des hydrogrammes de crue et par suite les rapports entre le débit maximum de la crue et ce débit moyen. Ce rapport, ou coefficient de pointe est de :

- 2,28 le 26 septembre 1978, 2,07 le 2 septembre 1981 et 2,03 le 13 septembre 1981 pour la Ribeira Brava
- 2,04 le 9 septembre 1980, 2,55 le 2 septembre 1981 et 2,07 le 13 septembre 1981 pour la Ribeira Grande.

Un nouveau calcul donne :

Tableau 6.10

	Ribeira Brava 6,7 km <sup>2</sup>	Ribeira Grande 11 km <sup>2</sup>
Valeur en m <sup>3</sup> hydrogramme de pointe (avec K = 0,8)	418 000	110 000
Temps de base retenu	1 H 30	1 H 45
Dé bit moyen	77,4	17,5
coefficient de pointe	2,05	2,10
Maximum m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	159	36,7
en ls <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup>	23 700	3 340

Les résultats sont légèrement supérieurs aux débits maximums calculés par les relations proposées (+ 10 % pour la Ribeira Brava, + 22 % pour la Ribeira Grande).

En appliquant à São Nicolau une méthode déterministe globale mise au point par OLIVRY (1986) sur un échantillon de bassins versants du Cameroun recevant des averses journalières décennales de 80 à 140 mm et inspirée de la méthode RODIER-AUVRAY (1969), on peut tenter une détermination de

la "crué décennale" par de simples abaques. Cette méthode implique de connaître des paramètres simples comme Rnn pour le relief, Pe pour la perméabilité du bassin et Ve pour la végétation (1).

Les figures 6.38 à 6.41 présentent ces abaques donnant Rnn, le coefficient de l'écoulement Kr et le débit maximum spécifique de la crué.

On obtient les résultats suivants :

Tableau 6 11 : Méthode graphique de predetermination de la crué décennale

		Ribeira Brava 6,7 km <sup>2</sup>	Ribeira Grande 11 km <sup>2</sup>
Indice de relief	Rnn	7,5	6,9
Perméabilité	Pe	2	5
Végétation	Ve	1	1
Superficie	S	6,7	11
Longueur rectangle équivalent	L	.	.
Abaque			
Produit PeV		2	5
d'où KR %		61	30
et He mm		83	38
Abaque			
Rapport PeV/R		0,267	0,72
d'où Q max l.s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup>		17 000	7 000
et Qmax m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>		114	77

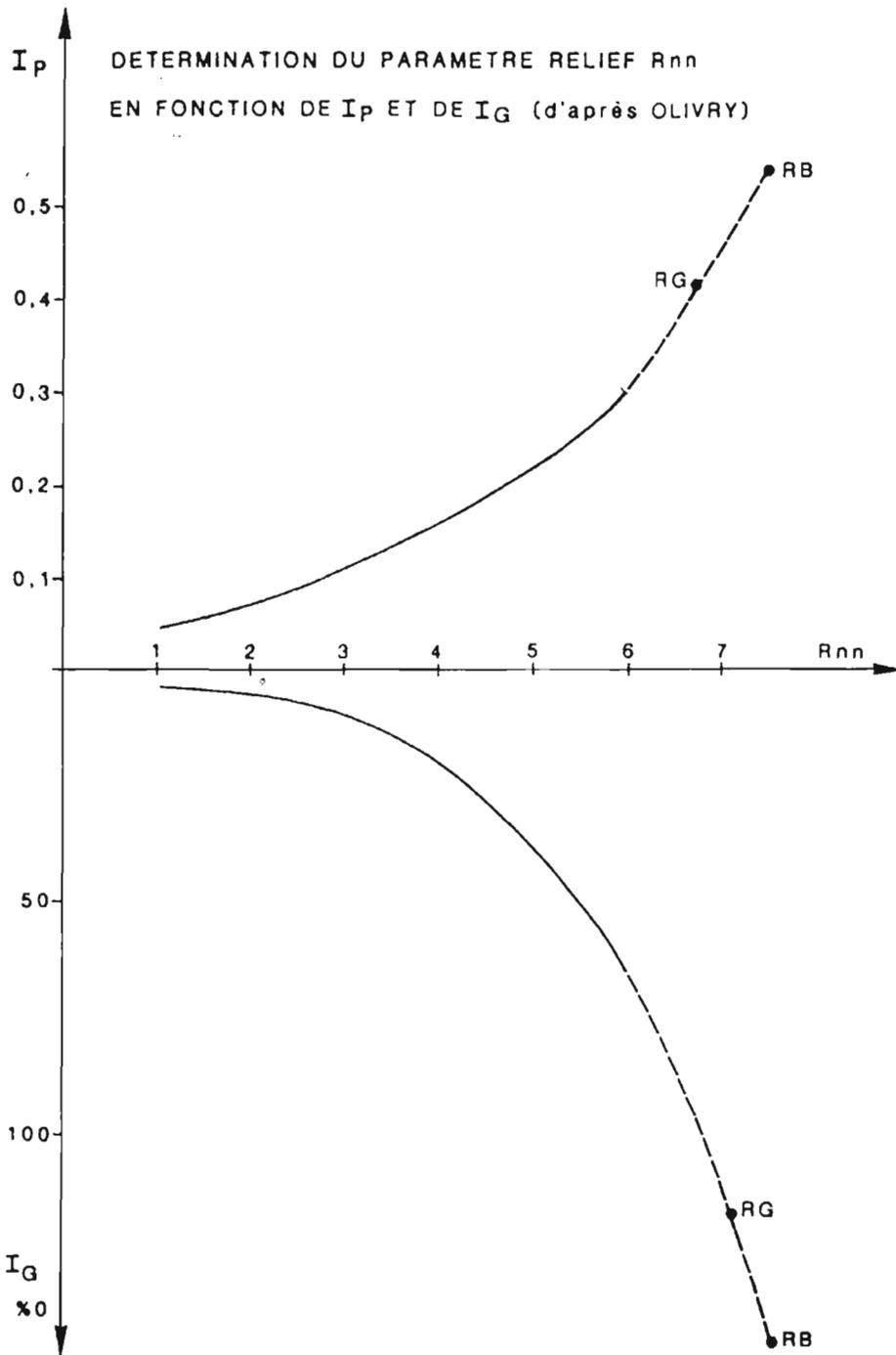
La méthode aboutit pour les débits maximums à des résultats qui semblent largement surestimés sur Ribeira Grande (le double des prédéterminations précédentes) et légèrement sous estimés sur Ribeira Brava (environ - 25 %).

Pour les lames écoulées, l'écart de la méthode est négligeable pour R. Brava (+ 6 %) ; il est par contre très élevé sur R. Grande (+ 90 %).

(1) La méthode propose des classes de perméabilités de 1 à 5, des bassins rigoureusement imperméables aux bassins très perméables (sables gris, roches fissurées, coulées basaltiques récentes, lapillis et cendres, karst), des classes

de couverture végétale de 1 à 4 de la savane à savane arbustive, strate graminée courte, mil, à la forêt dense ou dégradée avec cultures ou cultures industrielles (palmistes, hévéa, bananier et plantes de couverture).

Fig. 6-38



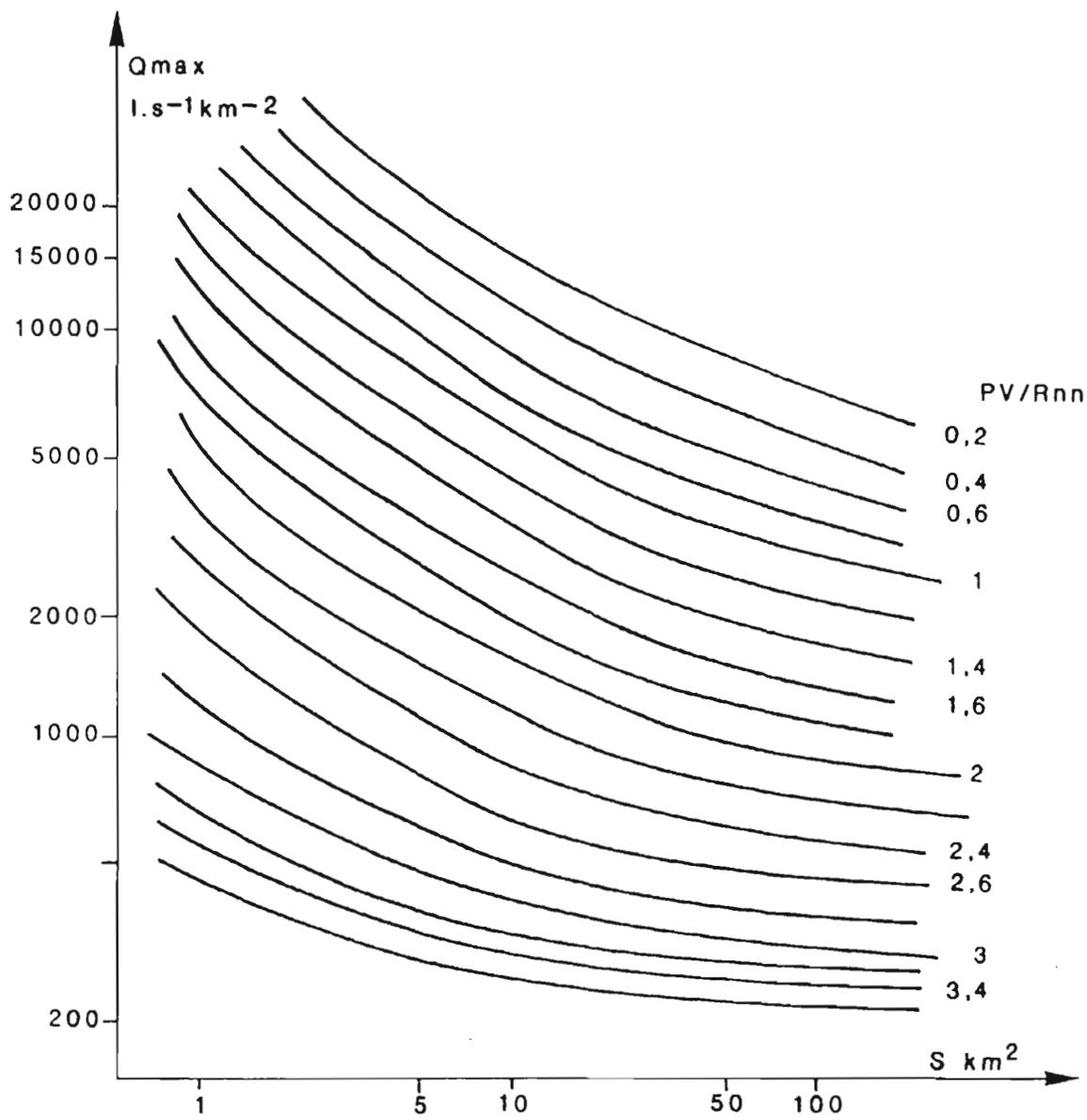


Fig. 6-39 Abaque de calcul du maximum de crue spécifique  
(d'après OLIVRY)

Fig 6-40 Abaque de calcul du coefficient de ruissellement  
(d'après OLIVRY)

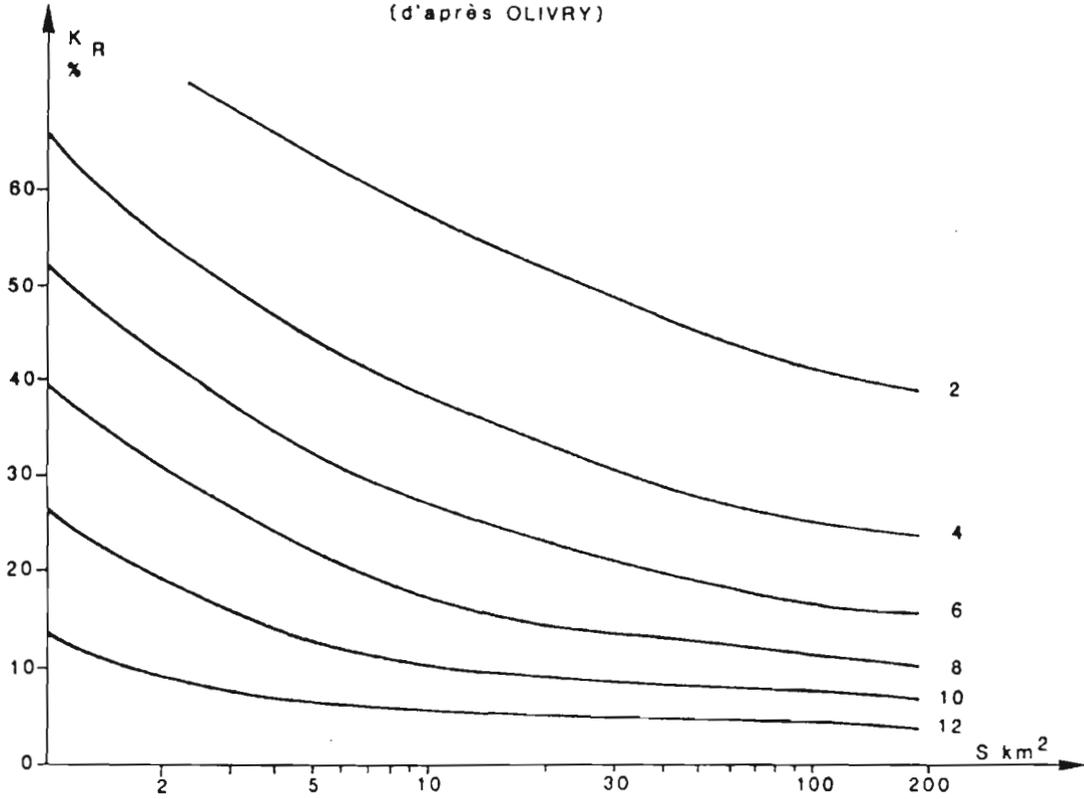
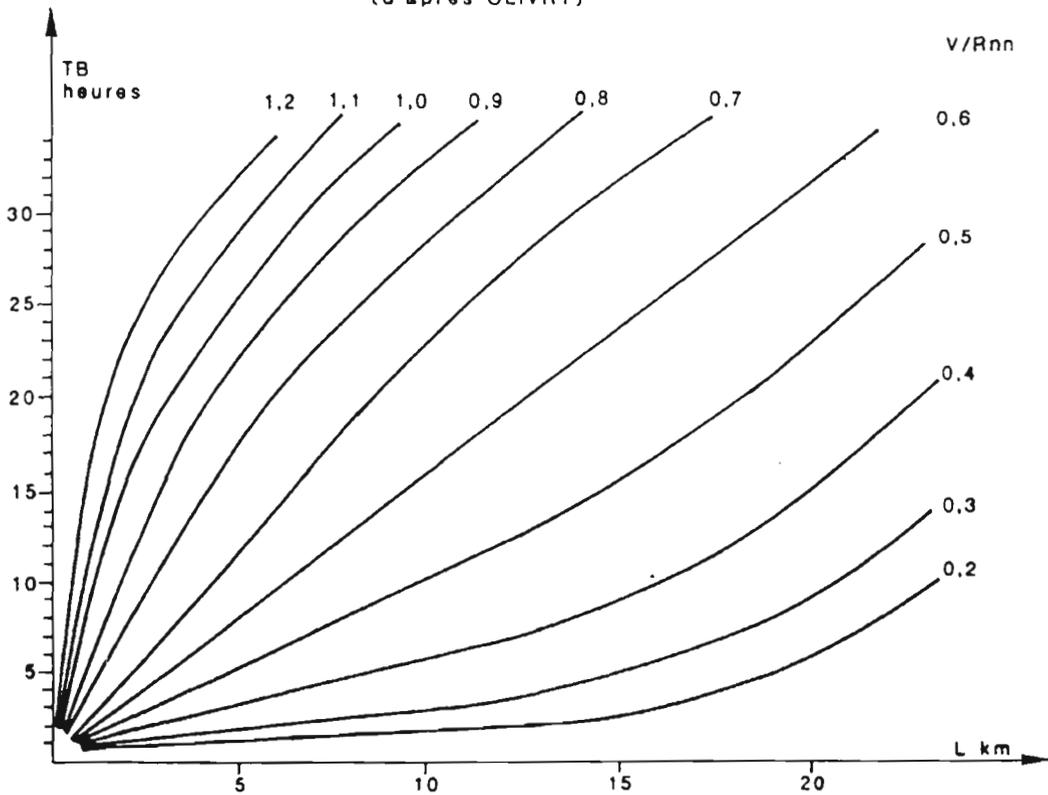


Fig. 6-41 Abaque de calcul du temps de base des crues  
(d'après OLIVRY)



L'application de la méthode aux limites de détermination des paramètres pour des bassins aussi particuliers que ceux de São Nicolau supposerait en fait une révision de ces paramètres : valeurs inférieures à 1 pour l'absence de végétation ; valeurs de perméabilité supérieures à 5 ; ou indication numérique de ces paramètres élargie. Mais avant de rechercher de meilleures adéquations, il faut se souvenir que ce type de méthodologie simple ne se justifie que si elle repose avant

tout sur la détermination objective et aisée des paramètres.

Le tableau 6.12 ci-après compare les résultats de la prédétermination de la crue décennale :

- 1) par les relations établies sur l'échantillon,
- 2) par la prise en compte de l'hydrogramme de pointe,
- 3) par application d'une méthode globale simplifiée.

Tableau 6.12 : Comparaison des trois méthodes de prédétermination de la crue décennale

Crue décennale Prédétermination	Ribeira Brava (6,7 km <sup>2</sup> )			Ribeira Grande (11 km <sup>2</sup> )		
	1	2	3	1	2	3
P mm	136	136	136	128	128	128
He mm	78	78	83	20	20	38
Q <sub>max</sub> m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	145	159	114	30	36,7	77
Q ls <sup>-1</sup> km <sup>2</sup>	21 600	23 700	17 000	2 725	3 340	7 000

Il n'apparaît pas nécessaire de trancher entre les résultats des déterminations 1 et 2 qui semblent constituer une fourchette plausible des caractéristiques de la crue décennale. A Ribeira Brava, la crue du 13 septembre 1981 peut être assimilée à la crue décennale. On relève que, pour ce bassin et pour des bassins à substratum comparable, les observations historiques ne manquent pas d'événements beaucoup plus importants. Plus que la détermination d'une "crue décennale", c'est de tels événements qu'il faut tenir compte dans le calcul de divers aménagements.

Par contre, sur la Ribeira Grande et des bassins de même type, la détermination qui a été faite montre que l'occurrence de crues catastrophiques y est très faible.

Pour revenir aux crues exceptionnelles, et après avoir dit que la crue du 26 septembre 1978 a probablement une période de retour de 50 ans, il faut ajouter à l'historique" dû au Professeur GOMINHO pour São Nicolau (cf. 3. description des crues), des observations de crues tout aussi exceptionnelles dans les îles montagneuses de San Antão, Santiago et Fogo.

Auguste CHEVALIER (1938) relate ainsi ses observations directes de 1934 à Sao Antao :

*"Je me trouvais à Campo de Cao à 300 mètres d'altitude sur le bord de la rivière Paul le 14 septembre lorsque survint l'après-midi une de ces pluies violentes. Elle continua toute la nuit jusqu'à l'après-midi du 15.*

*J'assistais alors à un spectacle grandiose. La rivière profondément encaissée ainsi que ses affluents qui ne laissent couler en temps ordinaire qu'un très modeste filet d'eau, se trouvèrent transformés brusquement en torrents charriant des eaux troubles avec une violence inouïe. Après la pluie, dans le lit de la rivière il y avait 3 à 4 mètres d'eau et un homme se noya avec sa mule en voulant franchir ce torrent, mais le tableau que j'avais sous les yeux était féérique. De toutes parts sur les deux versants par des pentes abruptes, une foule de ruisseaux laissaient tomber de puissants filets d'eau écumeux presque verticalement ou par cascades de plusieurs centaines de mètres de hauteur. Après la pluie, tous les chemins muletiers étaient transformés en torrents et pendant deux jours on ne pût circuler ni aller aux cultures. Le lit principal charriait à gros bouillons une eau jaunâtre et toutes les rives environnantes étaient inondées. Le ciel était alors obscur ; le sol était détrempé ; un vent violent agitait tous les arbres et arbustes. Il fallut plusieurs jours pour que la rivière reprenne son cours paisible habituel, pour que l'eau coulant redevenue claire et pour faire disparaître la plupart des cascades.*

*Le 16 au matin profitant d'une éclaircie je pus me rendre à Cova (850 mètres d'altitude) en suivant un petit sentier de montagne le long duquel l'eau coulait encore presque partout. La journée suivante fût ensoleillée jusqu'à 14 H. Puis le ciel se couvrit ; un brouillard épais nous enveloppa bientôt ; à 18 H une pluie fine commença à tomber, puis peu de temps après ce fut encore une avalanche d'eau qui dura toute la nuit et le jour suivant jusqu'à 16 H du soir. La pluie tombait par rafales successives, interrompues par les accalmies durant lesquelles nous restions enveloppés par la brume épaisse. On ne voyait pas à 50 mètres de distance. Par moment, on entendait un bruit sourd prolongé ; c'étaient des blocs de rochers qui s'éboulaient dans les vallées, véritables avalanches de pierres qui brisent toutes les cultures sur leur passage. Aussi les cabanes des paysans sont toujours construites sur des buttes naturelles en dehors des lieux exposés à ces avalanches.*

*La pluie reprit encore dans la nuit et se continua jusqu'à la soirée du 19".*

En septembre 1984, une nouvelle crue catastrophique a été observée sur cette rivière de San Antão : une équipe de télévision (FR3) en a tiré un document exceptionnel.

Mais ce type d'écoulement exceptionnel n'est pas une exclusivité des îles hautes. Une crue exceptionnelle a été observée en 1973 à SAL.

Dans l'île de Boa Vista, le 4 septembre 1980 suite à une averse particulièrement impor-

tante pour l'île (207 mm à Val Rei, 76,2 mm à Rabil, 115 mm à Fundo Vicente et Povoaceo Velha), on a observé une crue dans la Ribeira Telho à Baixa Rocha qui à atteint 1,4 m sur toute la section large de 250 m, événement jamais vu depuis 30 ans. A Fundo das Figuera l'eau est arrivée au pied du mur bordant le village et son niveau était à 5 mètres au-dessus du fond de la Ribeira.

Murs, digues, ouvrages en gabions, témoignent bien de l'aptitude des Cap-Verdiens à maîtriser les écoulements torrentiels exceptionnels qui caractérisent leur archipel.

En terminant l'étude des crues, il faut préciser plusieurs choses :

- l'étude des maximums de crue a porté sur deux types de bassins, mais pour chacun

D'eux les valeurs exprimées en  $m^3.s^{-1}$  ou en  $l.s^{-1}.km^{-2}$  ne se rapportent qu'à une seule taille de bassin (6,7  $km^2$  pour la Ribeira Brava, 11  $km^2$  pour la Ribeira Grande). Il n'est donc pas possible d'extrapoler facilement ce que peuvent devenir des maximums de crue spécifiques pour des superficies de bassin nettement plus grandes ou plus petites.

- par contre, l'étude des coefficients d'écoulement, des lames et volumes écoulés permet, toujours pour ces deux catégories de bassins, d'estimer les écoulements de différents bassins dans la gamme des superficies rencontrées dans les îles hautes de l'archipel.

## CHAPITRE VII

### AUTRES MESURES EFFECTUEES SUR LES BASSINS ETUDIES A SAO NICOLAU



# AUTRES MESURES EFFECTUEES SUR LES BASSINS ETUDIES A SAO NICOLAU

## 1 MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES ET EROSION

### 1-1 GENERALITES ET METHODOLOGIE

Afin d'évaluer la dégradation spécifique des bassins et leur érosion, des mesures de transports solides ont été effectuées lors des principaux événements hydropluviométriques.

Les moyens mis en oeuvre ne permettaient que la mesure des matières en suspension (MES) provenant du "Wash-load". Les matériaux transportés par charriage (le bed load) galets, graviers, blocs n'ont pas été mesurés. Les tonnages exportés par charriage sont certainement importants au regard des vitesses mesurées et des dégâts causés aux appareils immergés. Mais la charge fine est encore plus importante et elle signifie l'ablation des maigres sols de culture dont disposent les habitants de São Nicolau.

Nous rappelons ci-après la méthodologie utilisée en citant notamment les instructions pratiques que nous avons été amené à donner aux équipes sur le terrain :

#### "- Prélèvements

*Compte tenu du brassage de ces torrents, on considère qu'un échantillon prélevé dans la section est représentatif de la charge solide à un instant donné.*

*Les prélèvements seront effectués au milieu de la section à l'aide d'un seau et d'une corde à partir du pont en aval pour RIBEIRA BRAVA, en aval station téléphérique pour RIBEIRA GRANDE. Le contenu du seau est versé à l'aide d'un gros entonnoir dans un jerrikan. Une deuxième prise est effectuée pour compléter le jerrikan.*

Les jerrikans sont bien entendu marqués (numéro ou lettres) et remplis dans l'ordre des marques.

Pour une crue à pointe unique, il n'est pas nécessaire d'utiliser tous les jerrikans. Ainsi pour Ribeira Brava, il paraît difficile de faire plus de 3 prélèvements pendant le temps de montée de la crue (avec le maximum), trois autres pouvant être faits pendant la décrue.

Des hydrogrammes à plusieurs pointes sur Ribeira Grande sont prévisibles ; il sera intéressant de faire des prélèvements aux différents maximums et minimums intermédiaires. Suivre le limnigramme.

Les prélèvements étant effectués conjointement avec les jaugeages, les numéros des jerrikans remplis pourront être indiqués sur le carnet de jaugeage en face de la mesure correspondante ou sur un cahier spécial avec mention de la cote et de l'heure. En cas de manque de jerrikans ... faire des prélèvements de un litre à partir du seau d'échantillonnage (à ne pas confondre avec les flacons résultant du traitement).

L'équipe d'appoint locale opérant sur Ribeira Grande lorsque l'autre équipe est à Vila effectuera également des prélèvements de débits solides comme indiqué.

#### - Traitement des échantillons

Une vingtaine de dames-jeannes de 10 litres auront été achetées et étalonnées (marquer

d'un trait à la peinture ou au scotch le niveau exact (des 10 litres).

Le contenu des jerrikans est agité pour remettre en suspension d'éventuels dépôts puis versés dans les dames-jeannes correspondantes (celles-ci auront été marquées suivant la numérotation -chiffres ou lettres- retenue pour les jerrikans) en ajustant le volume à 10 litres. On ajoute dans chacune une mesure de sulfate d'alumine en poudre (la mesure sera matérialisée par un petit tube à essai). Cette opération doit être rapidement faite afin de rendre disponibles les jerrikans. On laisse reposer 24 heures. Les suspensions se sont alors déposées au fond de la dame-jeanne. On élimine l'eau claire surnageante par siphonage à l'aide d'un tuyau cristal terminé par une canule en verre et guidé par une baguette rigide. Le débit de siphonnage doit être lent pour ne pas créer de courant d'aspiration. L'opération de siphonnage doit être effectuée avec précaution pour ne pas remettre le sédiment en suspension. On laisse environ 1 litre d'eau suivant l'importance du dépôt.

Le mélange "sédiment-eau" résiduel est versé dans un flacon de un litre, complété par un second flacon éventuellement, sur lesquels on indiquera le nom de la station, numéro jerrikan, date, heure et cote à l'échelle.

Faute de balance sur le terrain (1), on gardera ces flacons en collection pour retour et mesure

---

(1) la balance de précision a été prévue pour équiper le laboratoire du MDR à Santiago.

sur Praïa ou Dakar. Le nombre étant limité à 50 pour des raisons de transport, il pourra arriver que le stock soit épuisé. Dans ces conditions on procédera à la filtration des échantillons déjà recueillis (ou d'une partie) sur papier-filtre.

Avant utilisation, on écrira sur ceux-ci les références portées sur le flacon ; suivant la quantité de sédiment, plusieurs filtres seront utilisés successivement. Placer un récipient sous le filtre pour éviter de perdre l'échantillon si le filtre se perce. Après un bref passage de séchage à l'étuve, placer les filtres dans des pochettes vinyle marquées aux références de la mesure pour pesée à Praïa ou Dakar (tester l'étuve pour éviter de brûler le papier-filtre)".

## 1-2 MESURES QUANTITATIVES DES TRANSPORTS SOLIDES

Trois événements hydropluviométriques présentent un intérêt dans cette étude par l'ampleur de la dégradation observée. Ils ont pu être partiellement mesurés.

### 1-2.1 La crue du 26 septembre 1978

Cinq prélèvements effectués en décrue sur la Ribeira Brava à Vila donnent les concentrations suivantes (tableau 7.1).

Seule la concentration maximale observée paraît représentative de l'énorme débit solide

Tableau 7.1.

Débit m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Concentrat. gl <sup>-1</sup>	débit solide kg.s <sup>-1</sup>
27,0	123	3324,0
0,8	51	40,8
0,5	64	32,0
0,015	78	1,17
0,015	15	0,225

qui a transité à la station lors de cette crue exceptionnelle.

Les observations de 1981 (2 septembre 81) montrent qu'une concentration moyenne de 150 g/l doit être envisagée pour l'ensemble de l'hydrogramme de crue. Il est en effet très important de souligner l'importante concentration mesurée à ce stade de la décrue. Cela suppose en effet un pouvoir érosif encore considérable du ruissellement alors que la première phase de la crue a procédé au nettoyage des versants et du lit des rivières.

Le poids de matières en suspension transportées au cours de cette crue du 26.9.78 aurait été de 97.500 tonnes.

Avec une densité du matériau évaluée à 1,3 c'est donc un volume total de 75.000 m<sup>3</sup> qui a été enlevé au bassin de la Ribeira Brava.

Cela correspond à une lame érodée de 11,2 mm. La dégradation spécifique annuelle 1978 serait donc de 14.500 tonnes.km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>.

Ces valeurs comptent parmi les plus fortes observées dans le monde. Rappelons toutefois que l'événement est exceptionnel (fig.7.1). Il n'y a pas d'observations faites sur la Ribeira Grande.

### 1-2.2 La crue du 2 septembre 1981

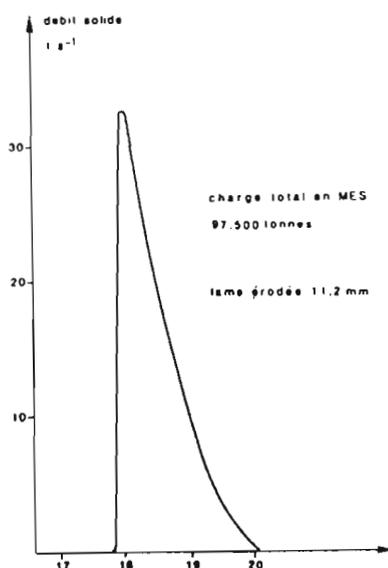
Quatre groupes de prélèvements ont pu être réalisés au cours de la crue de la Ribeira Brava. Les résultats sont donnés ci-après :

Tableau 7.2.

Haut. à l'éch.	Débit $m^3s^{-1}$	Concentrat. $gl^{-1}$	débit solide $kg.s^{-1}$
70	13,5	169	591
189	84,6	164	13874
90	22,2	127	2819
80	5,0	26	130

La concentration maximale est observée en cours de montée de la crue ; elle est pratique-

Fig. 7-1  
ESTIMATION DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS  
DE LA R.BRAVA A VILA  
Crue du 26.9.78



ment équivalente au maximum de la crue.

Le poids de matières en suspension transportées est de 22.500 tonnes, soit 3.360 T.km<sup>-2</sup>. Avec une densité de 1,3, le volume érodé est de 17.300 m<sup>3</sup> soit une lame érodée de 2,58 m.

### 1-2.3 La crue du 13 septembre 1981

#### 1-2.3.1 Sur la Ribeira Brava

Deux mesures sur la première crue observée vers midi le 13/9 donnent les résultats suivants :

Tableau 7.3

H cm.	Q $m^3s^{-1}$	Concentrat. $gl^{-1}$	débit solide $kg.s^{-1}$
60	9,5	43,6	414
40	5,0	41,8	209

L'équipe sera sur l'autre bassin pendant l'observation de l'hydrogramme principal.

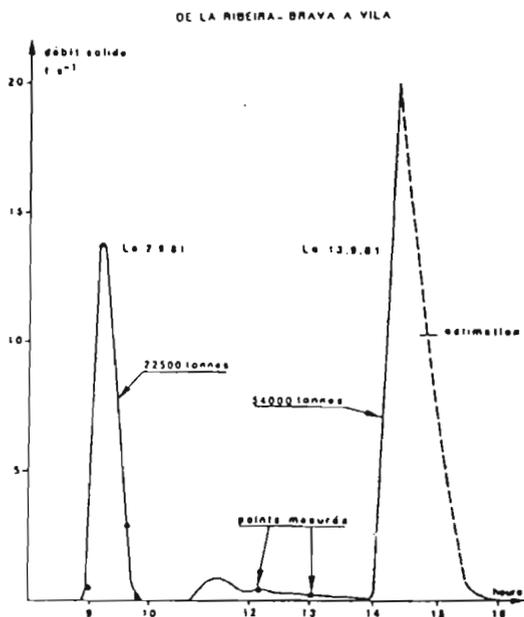
L'importance du débit (142 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) et les enseignements des deux crues précédentes observées conduisent à adopter une concentration maximale à peine inférieure au maximum du 2 septembre, soit 140 gl<sup>-1</sup>.

On en déduit une charge totale probable des MES de 54.000 tonnes soit 8.000 T km<sup>-2</sup>, un volume de 41.500 m<sup>3</sup> soit une lame érodée de 6,2 mm.

Là encore ces chiffres cadrent avec le caractère exceptionnel de la crue.

Pour l'année 1981 le bilan global est de 76.500 tonnes, soit pour l'année 1981 11.400 Tkm<sup>2</sup>

Fig. 7-2 TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION



### 1-2.3.2 Sur la Ribeira Grande

Les prélèvements effectués le 13 septembre 1981 aboutissent aux résultats suivants :

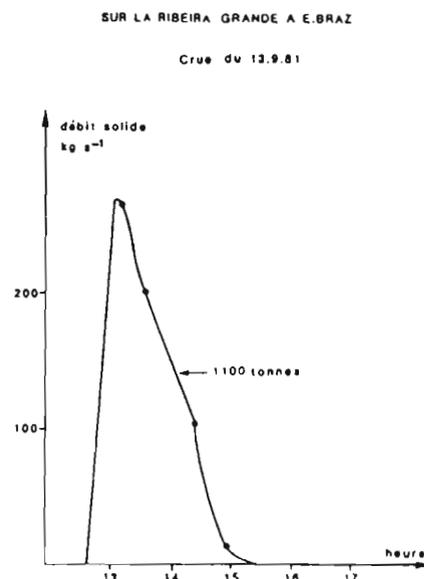
Tableau 7.4

H cm.	Q m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Concentrat. gl <sup>-1</sup>	débit solide kg.s <sup>-1</sup>
170	17,7	11,9	200
108	9,78	10,8	105,6
49	2,89	4,3	12,4

En prenant pour le maximum de la crue une concentration voisine de 12 gl<sup>-1</sup> pour un débit de 22 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, le débit solide maximum aurait été de 270 kg/s<sup>-1</sup>. La charge totale des suspensions est de 1.100 tonnes soit une

dégradation spécifique nettement plus faible que sur R. Brava -en parfait accord avec la géologie du bassin- de 100 T.km<sup>-1</sup>.

Fig. 7-3 TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION



Le volume d'érosion est de 850 m<sup>3</sup>, soit une lame érodée inférieure à 1/10 de mm.

Cette crue est la plus forte observée sur R. Grande. Elle survient après la crue du 2/9 qui a probablement nettoyé le bassin des matériaux superficiels sans cohérence du fait de la sécheresse. Il est donc légitime de penser que les concentrations ont été nettement plus élevées lors de la crue du 2.09.81 ainsi d'ailleurs que pour la crue du 26.9.78.

On peut proposer les chiffres suivants pour ces deux crues :

2.9.81	1000 tonnes
	soit 2200 tonnes pour 1981
26.9.78	1500 tonnes.

### 1-2.4 Bilan global des exportations de matières en suspension sur la période 1978-1983.

Sur ces six années, les effets de l'érosion hydrique sont négligeables en dehors des crues étudiées précédemment. Le bilan peut donc s'écrire pour la Ribeira Brava pour un total de 174.000 sur 6 ans, soit une moyenne annuelle de 29.000 tonne/an<sup>-1</sup> ou une dégradation spécifique de 4.300 Tonnes. km<sup>-2</sup>an<sup>-1</sup> ou une lame érodée "interannuelle" de 3,3 mm.an<sup>-1</sup>. Mais ces valeurs n'ont pas grande signification car il est difficile d'inclure un événement aussi exceptionnel que celui de 1978 dans une moyenne calculée sur 6 ans. S'il est vrai qu'en matière d'érosion en zones sensibles et à fort relief, on peut voir plus de matières transportées en une seule crue que sur une très longue période, on doit aussi relever les événements importants de 1981 survenus seulement 3 années après la crue de 1978. L'appréciation de l'"exceptionnel" reste alors très subjective !...

Pour la Ribeira Grande, les bilans en restent à une taille modeste avec seulement 3.600 tonnes exportées en 6 ans soit 600 tonnes par an et une dégradation spécifique "interannuelle" de 55 tonnes.km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, ou une lame érodée de 1/20 de mm an<sup>-1</sup> soit 60 fois moins que sur la Ribeira Brava .

### 1-3 MESURES QUALITATIVES SUR LES TRANSPORTS SOLIDES

#### 1-3.1 Granulométrie et minéralogie des Dépôts de la Ribeira Joao (26.9.78)

Après la crue du 26 septembre 1978, R. Gallaire a réalisé une coupe avec prélèvements au niveau de la Ribeira Joao dans un remblaiement survenu à la faveur d'une diminution locale sensible de la pente provoquée par un ouvrage de retenue. Les éléments de ce remblaiement paraissent représentatifs de ceux ayant provoqué l'atterrissement des digues avoisinantes.

Les éléments grossiers sont répartis comme suit :

Tableau 7.5

horizons distinctifs en cm	code prélèvement %	éléments > à 2 mm
28 à 24	K <sub>1</sub>	25,6
24 à 13	K <sub>2</sub>	76,4
13 à 5	K <sub>3</sub>	90,3
5 à surface	K <sub>4</sub>	90,3

Les nombreux ouvrages de retenue barrant le lit des ribeiras n'apparaissent donc bien efficaces que pour les matériaux grossiers issus du "bed-load" dont l'accumulation locale est

susceptible de constituer des secteurs d'infiltration préférentiels lors des écoulements.

Le tableau ci-après présente les résultats de cette étude (pourcentages établis sur les poids des éléments constitutifs).

Une étude des éléments fins (<2mm) a permis

horizons	% argiles 0 à 2 $\mu$	% limons 2 à 20 $\mu$	% limons grossiers 20 à 50 $\mu$	% sable fin 50 à 200 $\mu$	% sable grossier 200 $\mu$ à 2mm	% eau	% matière organique	Total
K1	13,4	7,4	0,1	21,5	49,1	6,2	0,7	98,4
K2	6,5	3,9	0,6	7,0	79,9	-	0,3	98,2
K3	14,5	9,0	2,0	13,2	56,0	4,6	0,7	100,0
K4	7,8	5,0	1,1	18,1	63,5	4,1	0,4	100,0

Tableau 7.6 : Granulométrie de la partie fine des échantillons de la Ribeira Joao en 1978

La tendance structurelle est représentée dans la figure 7.4 (après élimination de l'eau et de la matière organique et extension jusqu'à 100%).

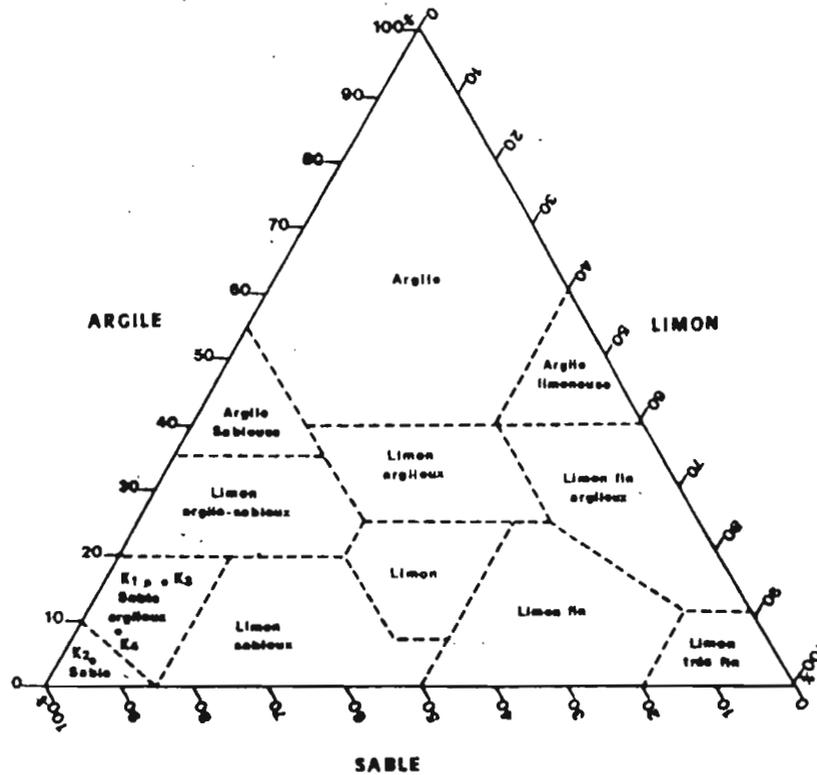


Fig. 7-4 REPARTITION GRANULOMETRIQUE DES ELEMENTS FIN DU PRELEVEMENT DE RIBEIRA JUAN

de définir la texture fine de chaque horizon.

A partir des prélèvements, a aussi été réalisée une étude des minéraux lourds visant à déterminer avec l'appui de la carte géologique les secteurs du bassin versant les plus exposés au "Wash-load".

L'étude des échantillons K<sub>1</sub> et K<sub>4</sub> prélevés à RIBEIRA JOAO a porté sur les fractions 0,05 à 0,2 mm et 0,2 à 0,5 mm, soit sur plus de 50% de la fraction fine à l'exception de l'échantillon K<sub>2</sub> où la fraction 0,5 à 2 mm revêt une certaine importance.

Le protocole d'analyse utilisé au Laboratoire de Géologie de Dakar est classique (Parfenoff, 1967, 1970) : 2 séparations aux liqueurs denses (Bromoforme pour la coupure à densité 2,9, Diodométhane pour la coupure à densité 3,3), séparation magnétique à l'aimant puis au séparateur iso-dynamique FRANTZ à 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8 et 1 Ampère, examen à la loupe binoculaire et au microscope polarisant.

Les résultats présentés (et obtenus par J.L. Grondin) ici sont qualitatifs, l'abondance croissante d'un minéral étant notée + à + + + +.

Minéraux	Echantillons			
	K1	K2	K3	K4
Augite	++++	++++	++	+++
Biotite			++	++
Chlorite	+++	+++	+++	+++
Hornblende Basaltique	++			++
Inclusions (magnétite, zircons,...)	+++	+++	+++	+++
Olivine	+			++

Tableau 7.7 : Répartition minéralogique des prélèvements de la Ribeira Joao en 1978

**Remarques :**

- a) la surabondance d'inclusions très magnétiques modifie considérablement la susceptibilité du minéral hôte et restreint ainsi l'aide du séparateur FRANTZ au niveau des déterminations.
- b) les pyroxènes sont, de loin, les minéraux les plus fréquents : il s'agit surtout d'Augite.
- c) l'altération est très avancée en particulier dans la fraction 0,05 à 0,2 mm : ouralitisation des pyroxènes (K<sub>2</sub>), chloritisation généralisée et, dans le cas de l'olivine, l'altération en iddingsite se fait toujours de la même façon, (à savoir des cristaux recouverts d'iddingsite fibreuse, elle-même bordée d'une zone périphérique d'Olivine non altérée).

d) la Hornblende, quand elle est présente, n'est pas altérée ; sa présence en K<sub>1</sub> et K<sub>4</sub> pourrait être liée à de fortes crues.

e) un examen au diffractomètre de Rayons X a permis de déceler la présence d'un intermédiaire entre Diopside et Hédénbergite ; le problème est de savoir si ce minéral provient d'enclaves de périodotites dans la série intermédiaire (amont du bassin) ou du complexe éruptif interne ancien.

f) aucun minéral pouvant provenir des pitons de phonolite n'a été rencontré.

### 1-3.2 Diffractométrie X des suspensions recueillies lors des crues de 1981

Nous avons été amenés à confier au laboratoire de diffractométrie X de l'ORSTOM à Dakar les échantillons de suspensions recueillies à Vila da Ribeira Brava lors de la crue du 2 septembre 1981 et sur la Ribeira Grande le 13 septembre 1981. M. Carn a procédé aux analyses diffractométriques et à leur interprétation.

Les résultats de ces analyses minéralogiques sont donnés dans le tableau 7.8

ANALYSES DISFRACOMETRIQUE DE SAO NICOLAU  
(Matières en suspension des crues de septembre 1981)

Sur poudre totale 7.8 A

Prélèvement	Code	Smectite	Illite	Kaolinite	Quartz	Augite	Silice amorphe
<u>Ribeira Brava</u> le 2.09.81							
Début de crue	OL.2	+++			?	tr	
Montée	OL.3	+++	tr.	tr.	tr.		
Maximum	OL.4	+++		tr.	tr.		
Décrue	OL.5	+++			tr. +	tr. +	
Décrue	OL.6				tr.	tr.	
<u>Ribeira Grande</u> le 13.09.81							
Début de crue	OL.1	Tr.		+++	++	+	
Décrue	OL.8	Tr.		+++	++	tr. ++	

Deux analyses ont été faites, l'une sur poudre totale, l'autre sur la fraction fine inférieure à 2 $\mu$ .

L'analyse par diffractométrie X sur poudre totale permet d'identifier deux populations d'échantillons bien distinctes :

Prélèvement	Code	Smectite	Illite	Kaolinite	Quartz	Augite	Silice amorphe
<b>Ribeira Brava</b> le 2.09.81							
Début de crue	OL.2	9.50	1.50				+
Montée	OL.3	9.75		0.25			+
Maximum	OL.4	9.50	0.25	0.25			+
Maximum	OL.5	9.75	0.25				+
Décru	OL.6	10.0		tr.			+
Décru	OL.7	9.75	0.10	0.15			+
<b>Ribeira Grande</b> le 13.09.81							
Début de crue	OL.1	7	1.0	2.0	+		+
Décru	OL.8	8	0.5	1.5			+

(1) Minéral à 7A° : Kaolinite mais peut-être aussi Halloysite deshydratée

+++ : minéral essentiel

++ : minéral abondant

+ : minéral assez abondant,

tr. : en traces

a) échantillons OL<sub>1</sub> et OL<sub>8</sub>, à dominante argilo-limoneuse avec pour minéral essentiel la kaolinite, correspondant aux MES prélevés sur la Ribeira Grande.

à partir de 110°C c'est dans cette bande qu'on retrouvera aussi l'Halloysite déshydratée normalement dans la même bande à 10A que l'illite.

b) échantillons OL<sub>2</sub> à OL<sub>7</sub>, à dominante argileuse avec pour minéral essentiel la smectite (Montmorillonite-Ca : argiles gonflantes), correspondant aux MES prélevées sur la Ribeira Brava.

Pour résumer ces analyses minéralogiques semi-quantitatives :

1°/ les matières en suspension de la R. Brava comprennent :

Les figures 7.5 à 7.8 reprennent les diffractogrammes obtenus sur 2 échantillons représentatifs des deux populations identifiées.

plus de 90% de smectites (Montmorillonite-Ca)  
de 8 à 10% de quartz, silice amorphe et des traces de kaolinite et augite illite.

On relèvera que M. Carn donne pour la fraction argileuse (<2 $\mu$ ) les résultats en analyse normale, après traitement de l'argile à l'éthylène-glycol (GLY) et après chauffage à 550°C. Ce dernier traitement permet d'identifier la smectite dont la réflexion basale passe de 17A à 10A. La réflexion basale de la kaolinite reste dans la bande de 7A, mais

Cette dominante smectitique correspond à un substratum de bentonites type.

2°/ Les matières en suspension de la R. Grande comprennent  
de 65 à 75% de kaolinite (et Halloysite déshydratée),

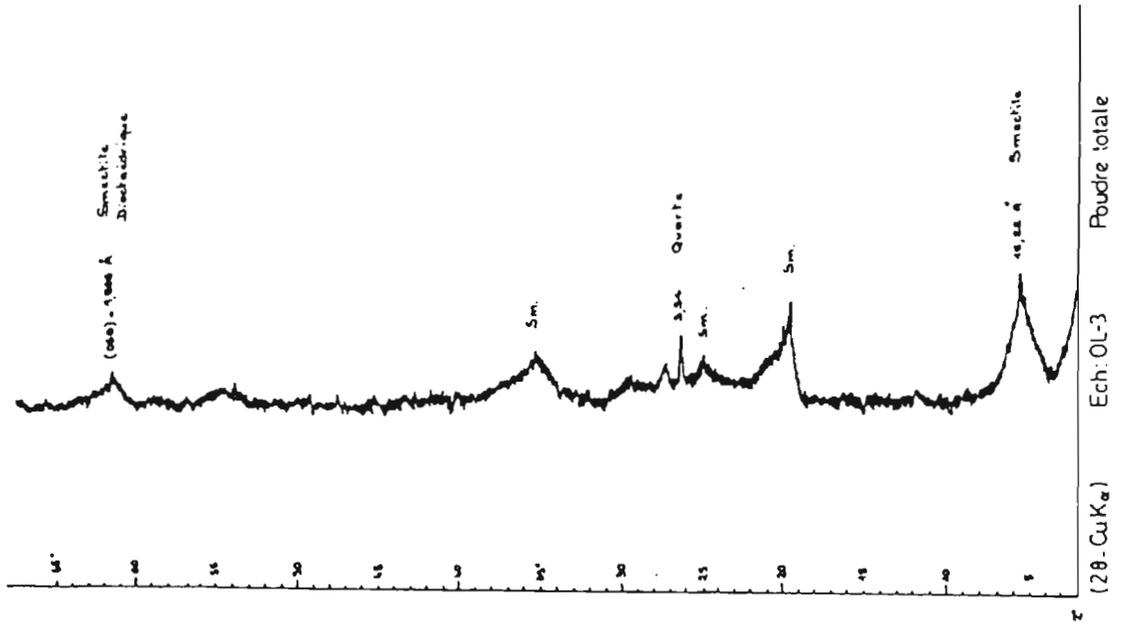


Fig. 7-5 DIFFRACTOGRAMME DES MES DE LA RIBEIRA BRAVA  
(Echantillon type de la série OL-2 OL-7)

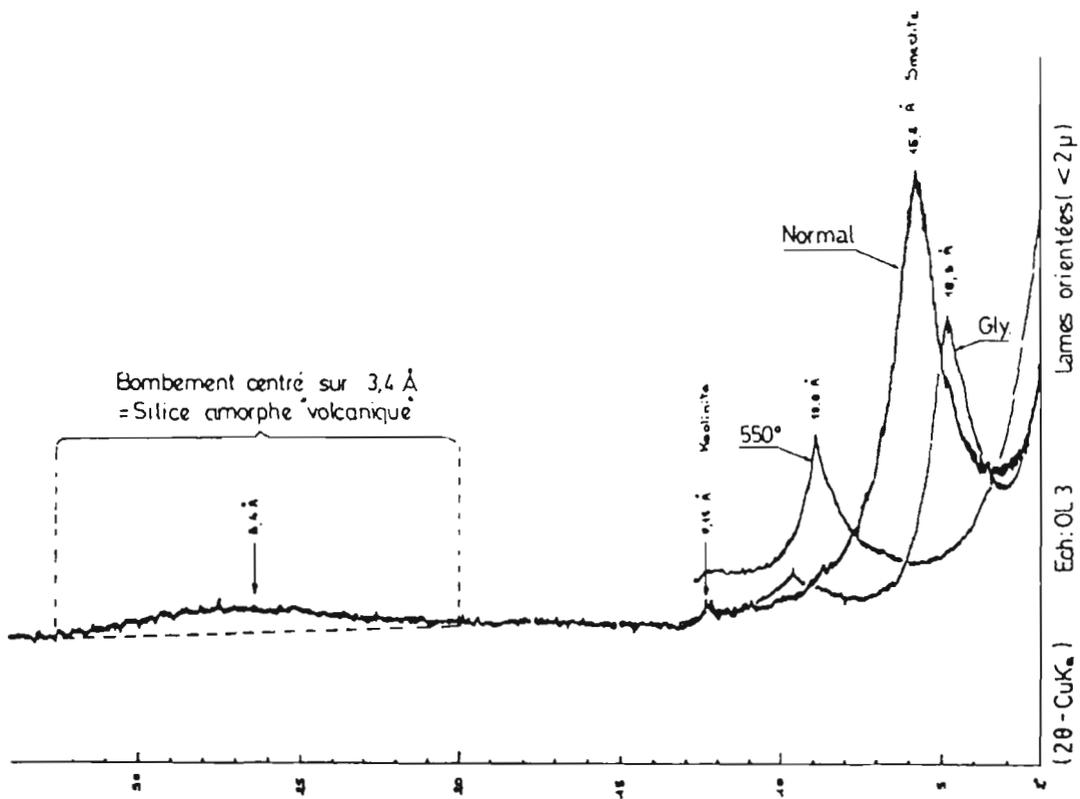


Fig. 7-6 DIFFRACTOGRAMME DES MES DE LA RIBEIRA BRAVA

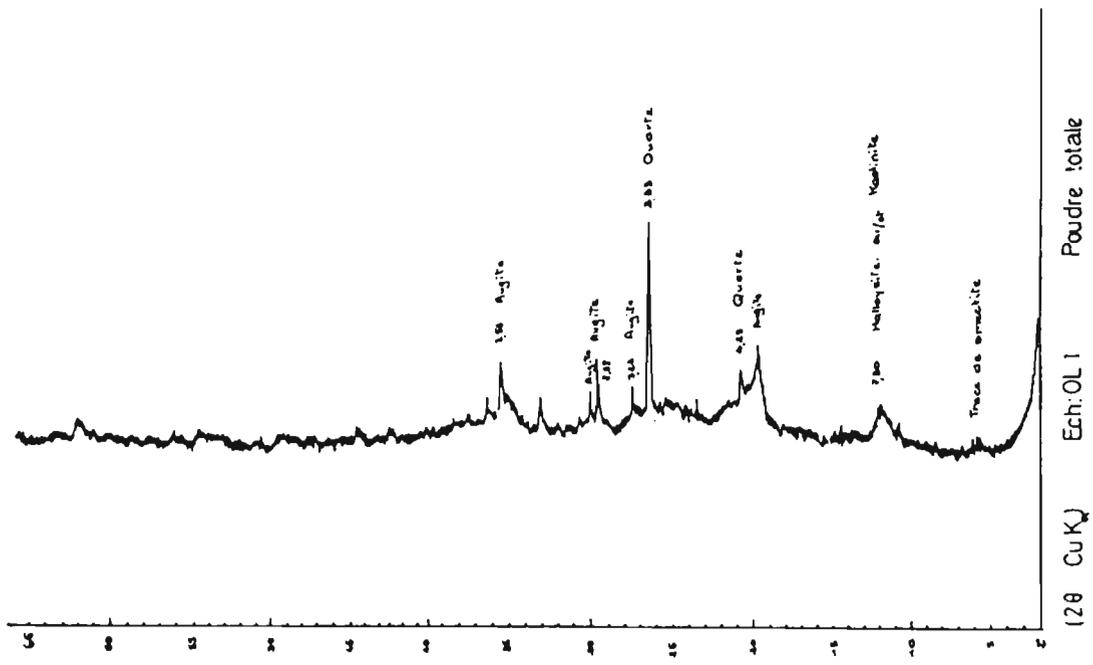


Fig. 7-7 DIFFRACTOGRAMME DES MES DE LA RIBEIRA GRANDE  
(Echantillon type de la série OL-1 OL-8)

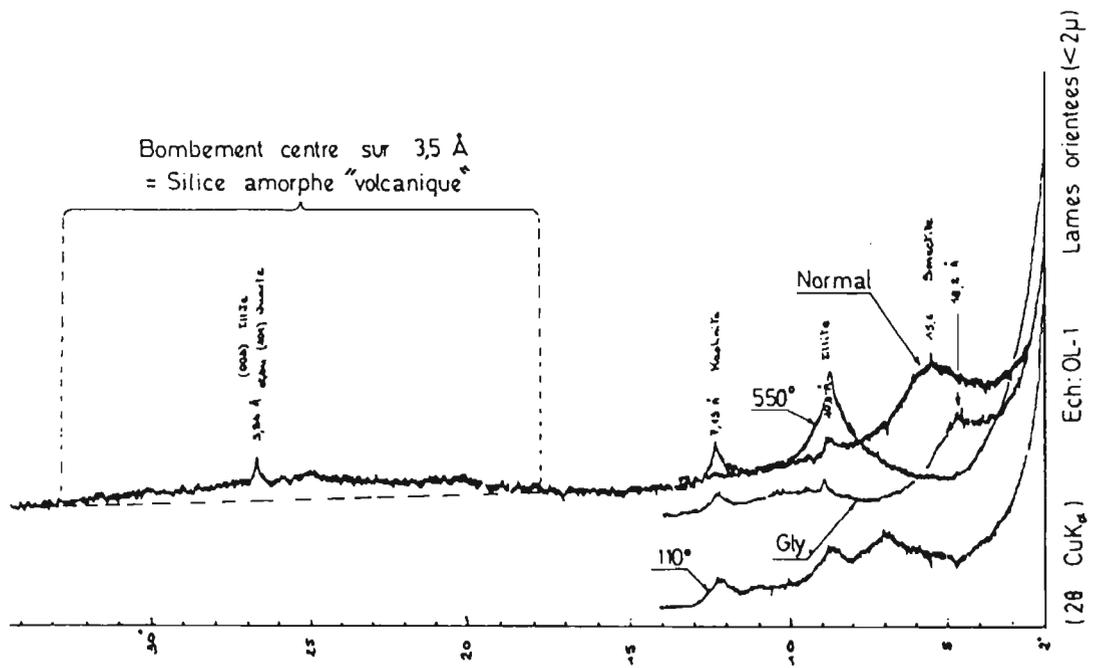


Fig. 7-8 DIFFRACTOGRAMME DES MES DE LA RIBEIRA GRANDE

environ 5% de smectite (Montmorillonite-Ca),  
 des traces d'illite,  
 20 à 30% de minéraux primaires (quartz +  
 augite) et silice amorphe,  
 et sont donc caractérisées par leur dominante  
 kaolinitique et les minéraux primaires  
 indicateurs par leur plus grande abondance  
 d'un volcanisme plus jeune.

L'interprétation des diffractogrammes peut  
 servir aussi à estimer la composition granulo-  
 métrique des matières en suspension. Cette  
 méthode indirecte donne une "granulométrie  
 virtuelle". Elle est basée sur plusieurs  
 considérations :

- tous les minéraux des argiles (Kaolinite,  
 illite, smectite) et la silice amorphe sont  
 supposés appartenir à la fraction  
 inférieure à 2 $\mu$ .
- tous les minéraux primaires sont soit des  
 limons, soit des sables ; un tamisage à 63 $\mu$   
 a été effectué pour estimer la quantité de  
 sable.

On a abouti aux résultats suivants :

<u>Ribeira Grande</u>	<u>Ribeira Brava</u>
Argiles (<2 $\mu$ ) 70 à 80%	> 95%
Limons (2 à 63 $\mu$ ) 15 à 25%	3 à 5%
Sables (>63 $\mu$ ) 2 à 5%	0%

Il était important de souligner la différence  
 fondamentale existant dans la composition, et

même la granulométrie, des matériaux  
 transportés en suspension par les crues.

Cette différence s'explique dans le cas présent  
 par des bassins versants lithologiquement  
 distincts et des volcanismes d'âges différents.  
 Des conditions différentes de drainage  
 pourraient être aussi invoquées.

Avec deux substratums différents, l'altération  
 a conduit à une dominante smectitique sur la  
 R. Brava, kaolinitique sur la R. Grande.

Seul le substratum du type du bassin de la R.  
 Brava paraît susceptible de subir une agression  
 aussi intense de l'érosion dans les îles du Cap-  
 Vert ; il correspond au complexe ancien et  
 aussi aux successions de coulées, tufs de la  
 série intermédiaire. La caractéristique  
 principale de ce substratum tient dans  
 l'abondance d'argiles smectitiques (montmo-  
 rillonite), typiques des bentonites. On peut  
 rappeler que les vraies bentonites sont les  
 produits d'altération du matériel volcanique  
 in situ. Parmi les processus d'altération, on cite  
 le plus souvent la transformation des cendres  
 volcaniques dans des bassins de sédimentation  
 de type marin ou lagunaire (Montmorillonites  
 miocènes de Camp Berteaux au Maroc  
 oriental). Cette hypothèse d'une  
 transformation des produits volcaniques en  
 milieu marin pourrait être corroborée par  
 diverses observations (pillow-lavas près de  
 Carvoeiros, et dépôts sédimentaires de Calejao  
 datés du Miocène supérieur par une faune de  
 foraminifères planctoniques (Serralheiro *et al.*,  
 1979).

## 1-4 CONCLUSIONS

Ce n'est pas un hasard si la tradition rurale se traduit dans le paysage du bassin de la R. Brava par de multiples banquettes antiérosives beaucoup plus nombreuses que sur le bassin de la Ribeira Grande. Malgré cela, on l'a vu, le substratum est tel qu'en dehors de versants et de dômes de cendres et lapillis non végétalisés et également très érodibles, la dégradation par l'érosion atteint des valeurs rarement atteintes dans le monde, lors d'événements hydropluviométriques qui, pour être rares, n'en font pas moins partie de l'histoire habituelle de l'Archipel. Les mesures effectuées montrent qu'un effort particulier de conservation des sols et de protection contre l'érosion doit être fait sur les bassins du type de la Ribeira Brava. Il est d'autant plus important de souligner le problème que l'on a parfois considéré l'érosif sans l'érodible ; certains auteurs n'ont pas différencié les sols volcaniques des îles du Cap-Vert qui possèderaient une stabilité structurale les rendant résistants à l'érosion : cela n'est pas vérifié sur les sols anciens que nous avons rencontrés. Quant à l'érosif, il est bien évident que des formules du type FOURNIER rattachant l'érosion en  $t.km^{-2}an^{-1}$  à un facteur précipitation FM n'ont pas leur utilisation ici.

La formule de FOURNIER, utilisée avec plus ou moins de bonheur sur des bassins fluviaux, est basée sur le rapport du carré des hauteurs de

précipitation du mois le plus pluvieux de l'année  $P_{Mi}$ , à celle du total de l'année considérée  $P_{Ai}$

$$Fm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{P_{Mi}^2}{P_{Ai}}$$

PARE (1979) indique pour São Nicolau des valeurs de Fm comprises entre 122 et 27 (122 pour Cachaço, Praia Branca, 89 pour Vila, 67 pour Estancia Braz et Calejao Posto). Ces valeurs correspondent d'après une classification de Souchier faite à Madagascar pour Cachaço à une tranche d'intensité horaire de  $90 \text{ mmh}^{-1}$  et pour Vila et Estancia Braz à une tranche d'intensité horaire de  $70 \text{ mmh}^{-1}$ . Ces tranches d'intensité correspondraient d'après les abaques du V.W.C.E. à des intensités maximales de 15 minutes de 176 et  $148 \text{ mm.h}^{-1}$  qui concorderont *grosso-modo* avec ce qui a été observé... mais cela ne nous dit rien sur les dispositions des matériaux respectifs des deux bassins à se laisser arracher par ces fortes intensités de pluie !

On ne peut conclure ce chapitre sur l'érosion hydrique sans évoquer l'érosion éolienne particulièrement active dans certaines zones de l'île (cendres volcaniques sans végétation) exposées aux alizés (Campo di Porto, Campo di Preguiça). On y observe de véritables tempêtes de poussières emportées vers la côte Sud de l'île.



Page précédente      1  
                                 2 3

1 et 2 : Transports de galets et blocs consécutifs à la crue exceptionnelle du 26 septembre 1978 sur la Ribeira Brava.

3 : Idem. On remarque que la base de l'arbre a été écorcée par le choc des galets transportés par la crue.  
(Photos R. Gallaire).

Page ci-contre :

1 et 2 : Griffures et rigoles d'érosion au flanc nord du Monte Gordo. Sur la partie droite de la photo 1, une réelle ravine est née avec son cône de déjection visible dans le bas-fond. Sur la photo 2, on note l'effondrement de murettes et des dépôts dans la partie basse.  
(Photos R. Gallaire).

3 : Un exemple d'érosion éolienne à Campo de Porto en période d'alizé.  
(Photo J.C. Olivry).





Crue du 2 septembre 1981 à Vila da Ribeira Brava ;  
l'exportation de produits argileux en suspension est particulièrement importante ; les  
concentrations ont dépassé 100 g par litre.  
(Photo P. Legal).

## 2 MESURES DES PRECIPITATIONS OCCULTES AU MONTE GORDO

### 2-1 GENERALITES

Certaines parties de l'île de São Nicolau présentent une forte nébulosité qui excède largement la durée de la saison des pluies. Ce sont les versants Nord des régions montagneuses qui sont affectés par ces brouillards souvent persistants au-dessus de 400 m d'altitude.

Cette nébulosité est à l'origine de précipitations occultes telle la rosée, qui bien que n'apparaissant que sous forme de traces dans les pluviomètres, doivent jouer un rôle non négligeable dans le bilan hydrique des régions d'altitude, d'abord par ses apports à la végétation, ensuite, en étant consommée par l'évapotranspiration, ce qui retarde d'autant la ponction dans la tranche humide du sol.

A. Chevalier (*op. cit.*) écrit en 1935 : *"Grâce au voisinage de la mer les condensations occultes sont importantes dans tout l'Archipel, spécialement sur les versants exposés à l'alizé et c'est sans doute ce qui permet à beaucoup de plantes de subsister, malgré l'extrême aridité. La rosée est surtout abondante dans les montagnes et au bord de la mer mais pendant la période d'Harmattan elle fait défaut et on constate alors une aridité surprenante comparable à celle qui s'observe au Sénégal et même*

*au Sahara. Dans les autres mois les condensations occultes nocturnes sur les plantes sont abondantes, notamment sur celles qui sont munies de poils glanduleux ou même sur celles qui ont des feuilles glabres. Au début de juillet dans l'île de Sal, sur les flancs de Monte Grande à moins de 200 m d'altitude, les feuilles d'Euphorbia Tuckeyana restaient couvertes d'une abondante rosée. Mais c'est surtout dans les ravins exposés au N-E, ravins fréquemment enveloppés par un épais brouillard que se maintient une humidité constante. Cette humidité permet la culture du caféier sans irrigation dans des endroits où il tombe moins de 50 cm de pluie par an, abrités, en outre, de l'Harmattan (1) Les rochers en rayonnant la nuit la chaleur qu'ils ont emmagasinée le jour, agissent aussi comme réfrigérants, aussi aux hautes altitudes portent-ils d'assez grandes quantités de mousses et de lichens.*

*Enfin, le phénomène d'absorption agit aussi pour amener la condensation de la vapeur d'eau dans les éboulis de pierres, dans les fentes des basaltes. S'ils se trouvent à proximité de l'humus, celui-ci retient l'eau produite et la cède lentement aux végétaux de la rhizosphère".*

---

(1) A Chevalier mentionne plus loin dans son ouvrage la disparition du caféier à São Nicolau "par suite probablement de la détérioration du climat et du sol"... et par là suppose le caractère limité des ressources en eau occultes. On sait que le caféier est toujours présent aujourd'hui à São Nicolau.

Ce phénomène est à rapprocher des brouillards observés dans les déserts côtiers du Chili septentrional et du Pérou et où une maigre végétation peut s'installer sur les collines côtières (les "lomas") en l'absence de toute précipitation effective.

La fréquence d'observation de cette masse d'air saturé d'humidité (nuages ou brouillards), liée à celle de vents dominants du Nord-Est assurant le renouvellement de la masse d'air humide, garantit pendant une grande partie de l'année un stock d'eau important en altitude dont les précipitations occultes ne représentent qu'une faible part disponible pour la végétation.

Mais ces précipitations dépendent de "la rugosité" du sol freinant le passage des masses nuageuses saturées, de tout obstacle vertical et en particulier de la végétation arborée qui capte au passage une partie de ses besoins en eau. Cet apport permet une meilleure croissance de la végétation et cette croissance entraîne des potentialités de captage plus importantes.

Une équipe chilienne a pu établir, par l'étude des isospatiales, que la quantité d'eau captée par la végétation ne dépendait pas de ses besoins mais de sa surface de contact. L'excédent d'eau peut être transmis au sol et au sous-sol, et même alimenter de petites sources. Les activités pastorales et l'abattage inconsidéré de ces arbres ont d'ailleurs entraîné le tarissement au Pérou de ces sources. Au Monte Gordo nous avons très bien

observé des sols saturés d'eau exclusivement placés sous les arbres (eucalyptus ou cyprès) et buissons. Si nous avons retenu le nom des "précipitations occultes" c'est bien parce que de tels apports hydriques pourraient avoir leur importance dans les bilans, si les efforts de reforestation conduisaient sur les terres hautes de São Nicolau à un développement important de la couverture végétale.

## 2.2. LES CAPTEURS DE BROUILLARD

Depuis longtemps, ces observations, faites dans les déserts côtiers et autres régions à forte nébulosité et à faibles ressources en eau, ont inspiré à l'homme l'idée de capter ces brouillards pour fournir une ressource en eau d'appoint aux populations des régions déshéritées.

De nombreux travaux ont tenté d'en déterminer la faisabilité et d'en préciser la rentabilité. Cette dernière suppose que le phénomène "brouillards" est quasi-permanent ; autrement dit, que la ressource soit garantie, si celle-ci doit subvenir à l'alimentation humaine.

C'est le cas des régions côtières du Pérou et du Chili avec la "Camanchaca"; ce n'est pas celui des îles du Cap-Vert.

Si à Juan Lopez (Chili) on peut capter jusqu'à 1.000 litres par jour avec un filet de 100 m<sup>2</sup>, si d'énormes structures de capteurs de brouillard y ont été conçues à titre expérimental ou opé-

rationnel (1), les mesures réalisées aux îles du Cap-Vert en particulier par F. REIS CUNHA (1964) sont loin d'être aussi prometteuses.

Des travaux relativement complets ont été réalisés sur la base des expériences publiées par d'autres chercheurs dans diverses parties du monde. Après des expérimentations en laboratoire, F. REIS CUNHA a multiplié les stations de mesure dans le massif de Malagueta à Santiago, au Monte Verde à São Vicente et à Campo dos Fontes à Brava. Il a en particulier testé l'efficacité relative de différents capteurs, panneaux rectangulaires (toile grillagée métallique ou plastique de différentes mailles), murs en pierres "sèches", réceptacles sous arbres etc. en 1963 et 1964.

Avec 2m<sup>2</sup> de surface utile, les capteurs de la

Malagueta recueillent de 200 à 600 litres par mois hors de toute précipitation ordinaire, avec des valeurs maximales journalières dépassant 40 litres. A Brava, pour les mêmes périodes, les valeurs mensuelles vont de 200 à 700 litres avec des maximums journaliers dépassant 100 litres. Le total de saison sèche (novembre à mai) atteint en moyenne 3.000 litres.

F. REIS CUNHA montre que ces capteurs de brouillard peuvent être d'un appoint intéressant dans la fourniture d'eau à de petites fermes isolées. Cela suppose d'installer quelques appareils et une citerne de stockage pour des jours sans brouillard. Cet auteur donne par ailleurs une cartographie île par île des zones favorables à l'observation régulière de ce type de formations nuageuses (cf. figure 7.9).

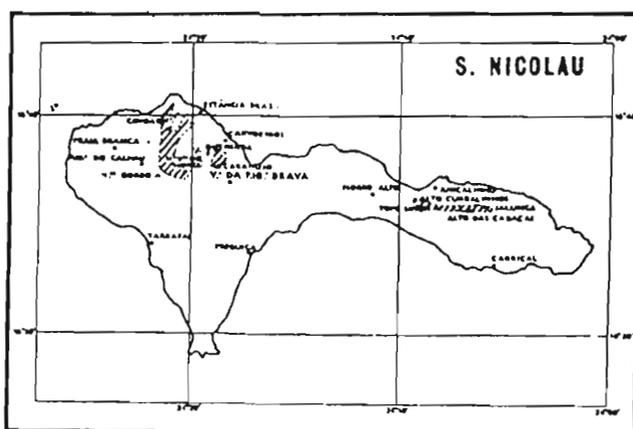


Fig. 7-9 Zones de précipitations occultes

(d'après F. Reis CUNHA)

(1) Ces capteurs ne se limitent pas à un simple écran récupérateur des gouttelles du brouillard; les chercheurs sud américains ont développé des structures rigides habillées d'un filet de jute présentant des formes géométriques calculées pour

une régulation et une distribution homogène du flux nuageux. On optimise dans de tels capteurs le piégeage de l'humidité disponible (Exemple : le capteur chilien type 781.026 d'une hauteur de 6 m).

## 2.3 L'EXPERIMENTATION DU MONTE GORDO

### 2-3.1 Implantation des capteurs

Deux capteurs de brouillard ont été installés au flanc du Monte Gordo dans le cadre d'une expérimentation commencée en 1981. Le premier appareil est situé à une altitude avoisinant 800 m au lieu dit "Caminho" sur la piste d'accès à la case forestière partant de Cachaço. Le deuxième appareil est sur la crête de la case forestière "Casa".

Ces appareils, conçus par J. COLOMBANI, ont été fabriqués et mis en place par R. HOORELBECKE. Chaque capteur présente une surface captante cylindrique de 0,35m<sup>2</sup>, constituée d'un fin grillage. La vapeur d'eau se condense sur cette surface et l'écoulement est enregistré à l'aide d'un pluviographe à augets basculeurs. Les capteurs sont surmontés par un toit métallique qui les abrite de la pluie verticale. Ils ne sont cependant pas totalement abrités de la pluie lorsque des rafales de vent la poussent à l'horizontale. Un pluviographe voisin, permet d'éliminer les jours où il y a eu précipitation normale. Si l'on tient compte de ce que les capteurs de brouillard de F. REIS CUNHA étaient en toile grillagée double, on ne doit considérer ici comme surface réceptive que celle du 1/2 cylindre (dont la hauteur est de 50 cm) soit 1.750 cm<sup>2</sup>. La photo (...) complète la description de cet appareil ; les résultats ne peuvent être vraiment comparés qu'à des capteurs du même type. Un simple rapport des surfaces

réceptrices ne rend pas compte des conditions différentes de captage. Enfin, il faut bien rappeler que les volumes recueillis constituent bien une indication de la précipitation de brouillard sur le capteur, donc l'indication de conditions climatiques particulières, mais pas une ressource en eau intervenant dans le bilan ; c'est l'appareil qui génère sa propre mesure dans des conditions de nébulosité et de vent favorables.

### 2-3.2 Les données

Les premiers enregistrements disponibles datent d'avril 1981. Mais ces premières données ne sont pas utilisables, les mesures présentant des lacunes et les dates étant parfois impossibles à obtenir avec précision (problème de formation de l'observateur).

Les premières mesures fiables datent de la fin du mois de septembre 1981. Plus de deux années d'enregistrement sont alors disponibles pour chacun des deux capteurs puisque l'on couvre la période qui s'étend de la fin septembre 1981 à février 1984.

Toutes ces données sont reportées dans les tableaux 7.9 à 7.16. Les volumes indiqués sont en litres, calculés à partir des enregistrements des appareils.

Certains totaux mensuels sont donnés sous réserve :

septembre 1981  
octobre 1981 } données incomplètes

Tableau 7.9 : CAP VERT - MONTE GORDO - CAPTEUR DE BROUILLARD CASA - ANNEE 1981 - VOLUMES EN LITRES

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet / Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1											
2											
3											
4											
5							0.40				
6							0.34				
7							0.56				
8							0.22				
9	N	N	N	0.12			0.38				
10	O	O	O				0.24				
11											0.24
12	F	F	F								
13	O	O	O								
14	N	N	N							0.24	0.56
15	C	C	C								
16	T	T	T								
17	I	I	I								
18	O	O	O							0.16	0.68
19	N	N	N							0.88	0.40
20	N	N	N		0.10					0.26	
21	E	E	E					1.52			
22	M	M	M	0.14				0.54	0.20	0.16	0.12
23	E	E	E					0.08			
24	N	N	N					0.08	0.20		
25	T	T	T	0.10				0.34	0.20		
26											
27				0.20							
28				0.52							
29									0.24		
30									0.06		
31											
Total				(1.08)	(0.10)		(2.14)	(2.56)	0.9	1.7	2

TOTAL ANNUEL : 10.48 litres

Tableau 7.10 : CAP VERT - MONTE GORDO - CAPTEUR DE BROUILLARD CASA - ANNEE 1982 - VOLUMES EN LITRES

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	JUILLET	AOÛT	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1									1.88			0.02
2								0.08	0.34	0.46		
3							0.22	0.04	0.48			
4							0.02	0.52	0.4			
5		0.04					0.08	0.04				0.04
6											0.04	
7					0.12				0.3			
8					0.26			0.04	0.78			
9			0.10		0.20			0.16	0.16			
10		0.06	0.18	0.34			0.08	0.20	0.12			0.10
11	0.08	0.16	0.24				0.20	0.20				
12	1.54		0.10				0.04	0.06				0.02
13		0.10										
14	0.06						0.64			2.16		0.02
15	0.16	0.14			0.32		0.54			0.52		0.82
16	0.08		0.14		0.06		0.34	0.46				0.04
17	0.20		0.30				0.16	0.50				
18	0.96		0.10			0.28		0.30				
19	1.60		0.38		0.08	0.28	0.04					
20							0.24	0.40				
21	0.28						0.04	0.15		0.12		0.28
22							0.32	1.14		0.08		0.63
23		0.16					0.18	0.96	0.16	0.14		0.54
24		0.20						1.20		0.44		0.24
25		0.04			0.04			0.6			0.12	
26		0.12			0.08			0.16				
27					0.44			0.9		0.12	0.20	
28			0.10		0.16			2.2			0.02	
29					0.22	0.38		1.0				
30					0.18	0.02		0.22				
31			0.12					1.04				
Total	4.96	1.02	1.76	0.34	2.16	0.96	3.14	11.74	4.62	4.04	0.36	2.48

TOTAL ANNUEL : 37.58 litres

Tableau 7.11 : CAP VERT - MONTE GORDO - CAPTEUR DE BROUILLARD - CASA - ANNEE 1983 - VOLUMES EN LITRES

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	AOÛT	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1										1.62		
2										0.02		
3	0.12											
4	0.04											
5										0.46	0.20	
6									0.40		0.02	
7										0.26	0.14	
8												
9												
10											0.32	
11									4.52		0.40	
12									30.6			
13												
14												
15									0.20			
16									0.76			
17									0.90			
18									0.14			
19								0.86				
20								0.30				
21								0.24	0.02			
22								0.82				
23								0.02				
24								0.60				
25								0.54				
26								0.02				
27								0.14				
28												
29												
30												
31												
Total	0.16	0	0	0	0	0	0	3.54	10.00	2.36	1.08	0

TOTAL ANNUEL : 17.14

Tableau 7.12 : CAP VERT - MONTE GORDO - CAPTEUR DE BROUILLARD - CASA - ANNEE 1984 - VOLUMES EN LITRES

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	AOÛT	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1	0.06											
2	0.02	0.50										
3		0.52										
4		0.20										
5	0.20	1.20										
6	0.46											
7	0.02											
8												
9	0.02											
10	0.56											
11	0.94											
12	0.04											
13	0.12											
14												
15	0.06											
16	0.14											
17	0.44											
18	0.18											
19												
20	0.86											
21	1.94											
22	1.74											
23	1.12											
24	0.04											
25												
26	0.02											
27												
28	0.68											
29	0.64											
30	0.38											
31	0.08											
Total	10.76	2.44										

TOTAL ANNUEL : 22.46

Tableau 7.13 : CAP VERT - MONTE GORDO - CAPTEUR DE BROUILLARD - CAMINHO - ANNEE 1981 - VOLUMES EN LITRES

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1												
2												
3												
4												
5												
6	N	N	N									
7	O	O	O							0.38		
8	N	N	N							0.08		
9												
10	F	F	F									
11	O	O	O									
12	N	N	N									0.72
13	C	C	C	1.26								0.28
14	T	T	T	1.94							0.16	
15	I	I	I	0.34								
16	O	O	O									
17	N	N	N		0.62**							0.06
18	N	N	N									0.68
19	E	E	E									0.44
20	M	M	M									0.38
21	E	E	E	0.78*					0.12			0.08
22	N	N	N	0.16*					0.50			
23	T	T	T				1.98		0.82			
24							1.38		1.44			
25							0.48		0.68			0.36
26							0.08					0.60
27				1.00								0.92
28				1.68					0.24			0.52
29				0.82								
30				0.62								
31												0.06
Total				(8.60)	(0.62)		(3.92)		(3.80)	(0.46)	0.16	4.90

TOTAL ANNUEL : 22,46

\* dans la semaine du 20 04 81  
 \*\* dans la semaine du 18 05 81

Tableau 7.14 : AP VERT - MONTE GORDO - CAPTEUR DE BROUILLARD - CAMINHO - ANNEE 1982 - VOLUMES EN LITRES

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1						0.14	0.16	3.04				
2						0.12	0.02	1.7				
3				0.06		0.10		0.04	0.6			
4					0	0.02		0.08	0.92			
5							0.32		0.32			
6					0.24		0.08		0.36		0.22	
7					0.28		0.32				0.20	
8					0.20			0.12				
9		0.02	0.22	0.160	0.04				1.8			
10	1.06	0.40		0.20	0.10		0.04		1.28			
11	0.08	0.66		0.20	0.16		0.32		0.2			0.04
12	1.10			0.06	0.14			0.38	0.48		0.04	0.04
13	0.40				0.14		0.36					
14		1.62			0.14		0.40			3.26		
15		0.04			0.06		0.64	1.24				0.16
16	0.08	0.16	0.06			0.08	0.24	0.80	0.2	0.12		0.02
17	0.20		0.28		0.04	0.22	0.74		0.64	0.08		
18			0.04		0.10	0.06		0.36	0.98	0.04		
19	3.04		0.20		0.14			0.24		0.06		
20			0.10		0.10		0.70					
21					0.10	0.04	0.26	1.12		0.08	0.26	0.18
22	0.04	0.20				0.16	0.20	0.52		0.02		0.16
23		0.32					0.20	2.14		0.04		
24								1.68				
25				0.16	0.08			1.0				
26		0.06		0.22	0.16	0.10		0.48			0.18	
27				0.20	0.18			2.40		0.04	0.02	
28		0.04		0.08	0.08			pluie nat		0.04		
29						0.02		pluie				
30						0.16		0.28				
31					0.10			1.0				
Total	6.00	3.52	0.90	1.34	2.58	1.46	5.56	13.92	11.70	2.88	0.92	0.60

TOTAL ANNUEL : 51.4

Tableau 7.15 : CAP VERT - MONTE GORDO - CAPTEUR DE BROUILLARD : CAMINHO - ANNÉE 1983 - VOLUMES EN LITRES

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1												
2												
3												
4	0.02									0.12	0.36	
5	0.02								0.12	0.74	0.40	
6	0.02								0.70			
7											0.12	
8										0.08		
9												
10											0.10	
11											0.52	
12									4.98		0.02	
13									0.92			
14												
15									0.08			
16									2.28			
17									1.02			
18									0.88			
19												
20								0.72			0.94	
21								2.28	0.16		0.58	
22	0.04							0.40			0.22	
23	0.02							1.68			0.12	
24											0.18	
25								0.52				
26								0.80				
27								0.46		0.06		
28								0.40	0.12			
29									0.04			
30									0.40	0.62		
31								0.02		0.20		
Total	0.12	0.98						7.28	11.70	1.82	3.56	

TOTAL ANNUEL : 24.48

Tableau 7.16 : CAP VERT - MONTE GORDO - CAPTEUR DE BROUILLARD : CAMINHO - ANNÉE 1984 - VOLUMES EN LITRES

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1												
2		0.08										
3												
4		0.20										
5	0.10	0.70										
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17	0.88											
18	0.44											
19												
20	1.64											
21	2.58											
22	1.62											
23	0.60											
24	0.04											
25												
26												
27												
28	0.32											
29	0.36											
30												
31												
Total	8.58	0.98										

TOTAL ANNUEL : 17.14

janvier 1982 } capteur 1 "caminho"  
 août 1982 } effets parasites  
 } induits par la pluie  
  
 printemps 1983 } absence de brouillard  
 } trop systématique

janvier 1982 } capteur 2 "casa"  
 août 1982 } effets parasites  
 } induits par la pluie  
  
 Printemps 1983 } absence de brouillard  
 } trop systématique mal-  
 } gré la forte sécheresse

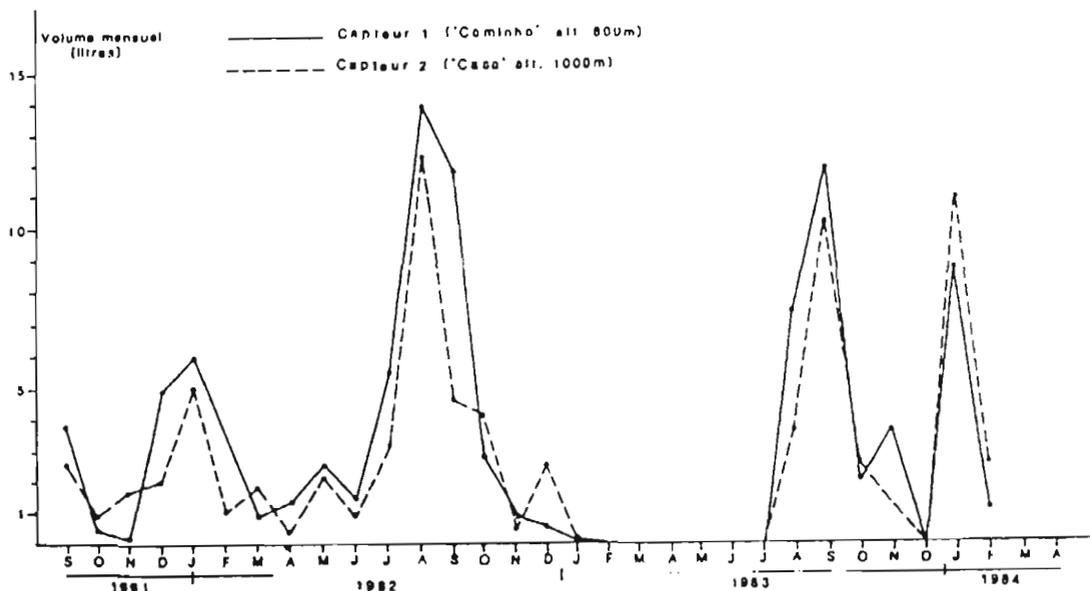
périodes privilégiées de précipitations occultes. Une première période de décembre à février et une seconde période qui couvre la saison des pluies, c'est à dire juillet, août et septembre.

Il est intéressant de constater qu'en dehors de la période de saison des pluies, c'est précisément pour les mois de décembre, janvier et février qu'on a les plus fortes chances d'apports pluviométriques non nuls. Mais les volumes de précipitations occultes les plus importants sont recueillis en saison des pluies. Ce qui s'explique à première vue par la forte couverture nuageuse qui couvre les sommets pratiquement en permanence, à cette époque de l'année.

### 2-3.3 ANALYSE DES RESULTATS

Ces quelques réserves établies, l'observation de la figure 7.10 montre l'existence de deux

FIG. 7-10 CAPTEURS DE BROUILLARDS . VOLUMES MENSUELS RECUEILLIS SUR LES CAPTEURS 1 et 2



L'année 1983-84 se différencie du schéma des années précédentes par un pic en janvier 84 pratiquement équivalent à ce qui s'est observé en septembre en 1983 et 1982. Ceci est peut-être dû à des conditions d'humidité liées à des pluies d'hiver exceptionnelles. La forte sécheresse 1982-1983 est sans doute responsable de la grande différence observée dans les observations hivernales de 1982 et 82-83.

Au cours des deux périodes pendant lesquelles les précipitations occultes sont importantes, les volumes recueillis sont plus importants pour le capteur 1 que pour le capteur 2. L'environnement immédiat des deux capteurs peut expliquer cette différence. Le capteur 1 (Caminho) se trouve dans une zone arborée et qui a donc tendance à retenir la couverture nuageuse. Le capteur 2, lui, est situé sur le haut d'une falaise dans une zone faiblement arborée qui, par conséquent, ne retient pas les nuages, entraînant des précipitations de moindre importance que pour le capteur situé plus bas.

On relèvera que le maximum observé en août 82 porte sur 13,9 l à Caminho et que, sur 30 mois de mesure, 3 mois seulement ont reçu plus de 10 litres à Caminho comme à Casa.

Les totaux annuels sont très disparates. Ils varient du simple au double à Caminho entre 1982 (51,4 litres) et 1983 (24,5 l) et à Casa : 1982 (37,6 l), 1983 (17,1 l).

Le total de l'année la plus forte, ramené à la superficie du capteur de F. REIS CUNHA (de

2 m<sup>2</sup>) ne concerne encore que 600 litres contre 3.000 litres relevés à Brava pendant seulement 6 mois de saison sèche.

Ces différences sont énormes ; elles peuvent indiquer que São Nicolau est moins exposé que d'autres îles à ces phénomènes de brouillard ou encore que ces phénomènes sont également affectés par la dégradation des conditions climatiques observées en vingt ans ; cela réduirait d'autant l'importance que l'on avait cru pouvoir donner à ces ressources et aux expérimentations qui ont été faites.

### 2.3.4 Recherches de corrélation

Diverses tentatives ont été faites pour rattacher les mesures effectuées sur une courte période à des variables climatiques.

E. SERVAT (1983) a procédé à des études de corrélation avec certains paramètres climatiques. Celles-ci ont pu être menées à bien sur la période s'étendant de la fin septembre 1981 à la fin juillet 1982.

Les données météorologiques utilisées ont été enregistrées à la station de Faja, située dans la vallée à une altitude de 390 m. L'éloignement de cette station (la seule disponible) par rapport aux capteurs est assez regrettable. Les résultats seraient plus probants si les variables climatiques pouvaient être enregistrées à proximité des capteurs de brouillards.

E. SERVAT s'est d'abord penché sur les couples (température, humidité relative) "générateurs" de condensation de vapeur d'eau en

d'eau en altitude avant d'étudier 3 types de liaisons : liaison avec l'humidité relative mesurée à Faja à 12 H, avec la température mesurée à Faja à 12 H et liaison entre les volumes recueillis sur chacun des capteurs.

Il propose ensuite l'étude de corrélations entre volumes captés et la température, puis l'humidité relative. Il aborde ensuite les liaisons entre les deux capteurs de Caminho et Casa. Ces recherches sont résumées ci-après :

a) Etude des couples (température - humidité relative)

(valeurs relevées les jours de précipitations occultes effectivement enregistrées).

Pour chacun des capteurs, on a tracé le nuage de points correspondant aux couples (température-humidité relative) enregistrés à 12 H à Faja espérant mettre en évidence un particularisme météorologique pour les jours de précipitations occultes.

Il n'en est rien. Dans chacun des cas (capteurs 1 et 2), le nuage de points couvre la zone 70 à 100% en humidité relative et 18 à 25°C en température. C'est à dire qu'a priori, et tout du moins en ce qui concerne ces deux variables climatiques, rien ne distingue les jours avec précipitations occultes des jours sans. N'importe quel jour sans condensation de brouillard enregistrée pouvant sans risque être placé dans cette plage de valeurs d'humidité relative et de température.

Ainsi, si ces deux variables climatiques sont a priori partie prenante dans le mécanisme qui occasionne des précipitations occultes, les relevés que l'on en obtient à la station de Faja ne permettent pas de caractériser la part prise dans le phénomène. C'est vraisemblablement l'éloignement de la station vis à vis des capteurs qui en est la cause.

b) Liaison volume capté-température

Il s'est posé le problème de la dispersion de l'échantillon.

Certains jours, de faibles valeurs de précipitations occultes ont été enregistrées, qui entraînent une grande dispersion, sans être pour autant très représentatives du phénomène.

Il a donc paru légitime de tronquer l'échantillon disponible. Le seuil de troncature retenu est de 0,12 l. On a éliminé les valeurs inférieures à ce seuil.

Dans un souci d'homogénéité, on a choisi la température relevée à 12 H. Les lacunes des observations météorologiques et les déficiences du matériel ne permettant pas un type de calcul unique de la température moyenne journalière.

\* Cas du capteur 1 :

Il y a 62 couples (température-volume) étalés sur la période du 21.9.81 au 31.7.82 et répondant aux exigences ci-dessus.

coefficient de corrélation = -0.2144

La droite de régression du volume en température a pour coefficient :

penne = a = -0.063

ordonnée à l'origine = b = 1.739

\* Cas du capteur 2 :

sur la même période (21.09.81 - 31.07.82) ce sont seulement 54 couples (température-volume) qui constituent l'échantillon.

coefficient de corrélation r = 0.0848

Coefficients de la droite de régression du volume en température :

$$\begin{cases} a = -0.0164 \\ b = 0.7067 \end{cases}$$

\* Discussion :

Dans les deux cas, et principalement pour le capteur 2, les coefficients de corrélation sont extrêmement faibles. La température relevée dans la vallée de Faja ne permet donc pas d'expliquer de façon satisfaisante les précipitations occultes enregistrées en altitude. L'extrême régularité des répartitions des températures au sein d'un pas de temps journalier permet d'affirmer qu'il en serait de même avec une série de températures relevées à une heure différente.

c) Liaison volume capté-humidité relative

L'échantillon disponible a été tronqué de la même façon que précédemment.

les valeurs d'humidité relative sont celles calculées à 12 H car jugées les plus représentatives.

\* Cas du capteur 1 :

L'échantillon est constitué de 61 couples (humidité relative-volume recueilli), toujours sur la période du 21.9.81 au 31.7.82.

Le coefficient de corrélation obtenu est de :  
r = 0.1744

La droite de régression du volume en humidité relative a pour coefficients :  
a = 0.0086  
b = -0.3285

\* Cas du capteur 2 :

L'échantillon représentatif du 21.9.81 au 31.7.82 compte 53 couples (humidité relative-volume recueilli).

Coefficient de corrélation : r = 0.2448

La droite de régression du volume en humidité relative a pour coefficients :  
a = 0.0092  
b = -0.4330.

\* Discussion :

Les coefficients de corrélation sont, dans les deux cas, aussi peu significatifs que précédemment. Les échantillons sont pourtant représentatifs, étalés sur une longue période et comportant un nombre de couples de valeurs assez élevé.

L'humidité relative, comme la température, dès lors qu'elle est mesurée dans une station météorologique assez éloignée des capteurs, ne permet pas d'expliquer le mécanisme qui entraîne les précipitations occultes. Ces deux variables climatiques ont pourtant certainement un rôle actif dans le phénomène que seules des mesures réalisées à proximité des capteurs de brouillard pourraient mettre en évidence.

d) Liaison volume capté en 1-volume capté en 2

L'échantillon de couples de valeurs (volume capté en 1-volume capté en 2) peut être constitué sur la période du 21.9.81 au 16.10.82

Afin de satisfaire aux hypothèses préalablement formulées, on ne retiendra pas :

- les couples de valeurs présentant l'un des termes nul et l'autre inférieur à 0.12 l ;
- les couples de valeurs présentant les deux termes inférieurs à 0.12 l.

Dans ces conditions, l'échantillon constitué compte 129 couples de valeurs.

Le coefficient de corrélation obtenu sur cet échantillon est de :  $r = 0.6079$

Les coefficients de la droite de régression sont :

$$a = 0.4176$$

$$b = 0.1097$$

\* Discussion :

Il semble donc exister une liaison concernant l'importance des volumes recueillis simultanément sur chacun des capteurs de brouillard. Cela paraît bien normal du fait de la proximité des deux stations. Cependant, cette liaison reste assez faible. Mais, cette simultanéité ne permet pas d'expliquer le mécanisme entraînant les précipitations occultes et ne présente guère d'intérêt en soi.

## 2-3.5 Conclusions

Au terme de cette première étude sur les précipitations occultes sur le massif du Monte Gordo (île de São Nicolau), quel bilan peut-on faire ?

Il semble que ces précipitations aient principalement lieu durant deux périodes privilégiées de l'année. C'est en période de saison des pluies (juillet-août-septembre) que les volumes recueillis sont les plus importants. De même en décembre, janvier et février, le phénomène prend une certaine importance.

Dans l'état actuel des choses, il n'est guère possible d'explicitier le mécanisme inducteur

de ces précipitations occultes à partir des variables climatiques disponibles, et, *a fortiori*, de le quantifier.

Les recherches effectuées sur la température et l'humidité relative, variables dont on sent qu'elles pourraient jouer un rôle non négligeable, n'ont pas conduit à des résultats satisfaisants.

L'éloignement de la station météorologique des lieux de mesure des précipitations occultes constitue vraisemblablement la cause principale de ces mauvaises corrélations.

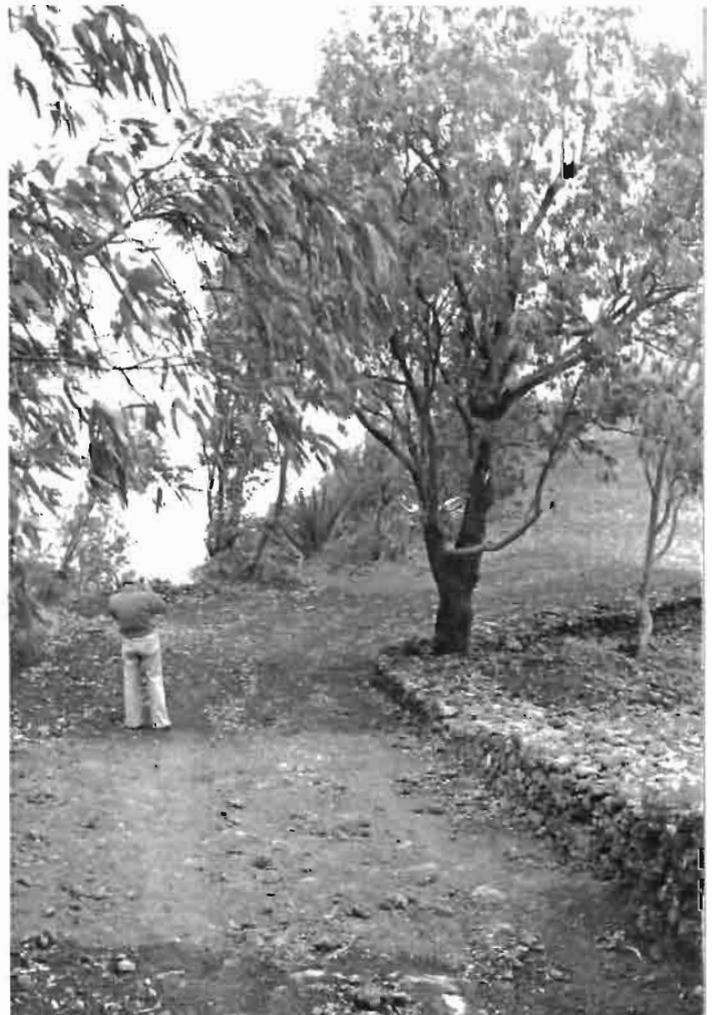
Mais c'est la mesure d'un troisième paramètre climatologique, le rayonnement solaire, qui

permettrait, peut être, d'avancer un début d'explication et de quantification du phénomène puisque les deux principales périodes d'occurrence des précipitations occultes se situent lorsque la couverture nuageuse de l'île est la plus importante.

Le caractère limité de ces ressources en eau ne justifie probablement pas la reprise d'expérimentations plus poussées à São Nicolau. Celles-ci impliqueraient en tout état de cause l'implantation de stations météorologiques au site des capteurs dont les modèles devraient être diversifiés.

Interception des brouillards par les eucalyptus des zones de reboisement du Monte Gordo. Le "captage" est suffisamment important pour s'égoutter sur le sol et imbiber nettement celui-ci.

(photo J.C. Olivry).





"Précipitations occultes" captées par un olivier macaronésien, au Monte Gordo ; sous le vent de l'arbre le sol est saturé d'eau en surface.

(Photos J.C. OLIVRY).



Type de "Capteur de brouillard" proposé par J. COLOMBANI et réalisé par R. HOORELBECKE ; implantation à Casa di Monte Gordo.



# CHAPITRE VIII

## BILANS HYDROLOGIQUES ET RESSOURCES SOUTERRAINES



# BILANS HYDROLOGIQUES ET RESSOURCES SOUTERRAINES

## 1. BILAN HYDROLOGIQUE ET INFILTRATION

### 1.1 CRITIQUE DES BILANS ANTERIEURS

1°) Dans sa mission exploratoire sur l'évaluation des ressources en eau, le BURGEAP (1974) a utilisé une formule empirique donnant la lame d'eau infiltrée (I) à partir de la hauteur des précipitations annuelles (P) (en mm).

$$I = 0,25 (P - 300)$$

Ce type de formule s'appuie sur un calcul de l'évapotranspiration réelle mensuelle suivant la formule de L-TURC qui s'écrit, pour un mois donné :

$$ETP = 0,4 (I_G + 50) T/(T + 15)$$

T étant la température mensuelle moyenne en °C,

$I_G$  étant le rayonnement global, fonction de  $I_{G_A}$  donné par des tables en fonction de la latitude et de la durée observée de l'ensoleillement sur la durée théorique du jour (h/H).

Dans l'étude citée, on peut supposer que les données de température utilisées sont des valeurs interannuelles (variant peu pour un

mois donné d'une année à l'autre). Faut de données héliographiques, on a pu prendre un  $I_G$  compris entre 0,8 et 0,7  $I_{G_A}$ .

L'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) est satisfaite globalement ou partiellement suivant les hauteurs mensuelles de précipitations et le stock d'eau disponible dans le sol appelé "Réserve facilement utilisable" ou RFU et on en déduit l'évapo-transpiration réelle mensuelle (ETR) mois par mois et pour l'année.

La différence entre P et ETR est appelée "Excès d'eau". ETR est bien sûr très dépendant de P mensuel et de la RFU (choisie égale à 100 mm dans cette étude) ; finalement, ETR varie assez peu sur le total annuel d'une année à l'autre. L'excès d'eau est, par suite, essentiellement dépendant de P ; l'étude graphique de n stations années n'a d'autre intérêt que de déterminer dans l'étude citée un seuil moyen correspondant à l'ETR moyenne de 300 mm et de justifier le terme (P - 300) supposant qu'en-dessous d'une hauteur de précipitation annuelle de 300 mm il n'y aurait pas excès d'eau et donc pas d'infiltration et de réalimentation des nappes, et pas davantage d'écoulement superficiel.

Sur la base d'observations de quelques crues probablement exceptionnelles, l'infiltration est alors estimée au 1/4 de l'excès d'eau. Les auteurs, conscients du caractère approximatif

de la formule proposée, en particulier dans les île basses, y situent à 200 mm la précipitation annuelle limite.

Mais dans des régions où la répartition des pluies dans le temps est aussi variable, où les fortes averses ne sont pas rares et ont un poids relatif important dans le total annuel, les méthodes de bilan global annuel ne sont pas utilisables.

2°) Dans une étude plus récente (BURGEAP, 1983) dans le massif du Pico da Antonia à Santiago, les auteurs calculent les bilans hydrologiques par décades après élimination de la part immédiatement ruisselée suivant des coefficients de ruissellement inspirés des études ORSTOM à S. Nicolau. La RFU a ici été estimée à 50 mm ; c'est aujourd'hui la valeur communément admise aux île du Cap-Vert ; des mesures physiques des horizons pédologiques superficiels permettraient de préciser les valeurs suivant les types de sol ou de couverture.

En sommant les excès d'eau obtenus par différence entre la pluie décadaire et l'évapotranspiration TURC, on rejoint la méthode précédente qui relie l'excès d'eau annuel à la pluviométrie annuelle. Même au niveau de la décade (par rapport au mois) on introduit l'imprécision de la répartition des pluies au sein même de la décade ; ainsi, suivant qu'elle tombe le premier ou le dernier jour de la décade, une pluie qui reconstitue les 50 mm de RFU alimentera pour 10 ou 1 jour la demande d'évapotranspiration.

## 1.2. BILAN HYDROLOGIQUE JOURNALIER

La méthodologie utilisée est basée sur l'étude de la chronique des pluies journalières, les déterminations faites au niveau de l'évapotranspiration potentielle, et les études sur l'écoulement. Une averse journalière donnée intervient :

- dans la réhumectation de la tranche superficielle du sol (capacité de rétention ou réserve facilement utilisable) jusqu'à saturation,
- dans la fourniture des besoins en évapotranspiration,
- éventuellement au niveau de l'écoulement de surface,
- pour le résidu, dans l'alimentation (infiltration) des nappes souterraines.

Certaines hypothèses ont dû être faites au niveau des études de bassins de l'île de S. Nicolau :

- Le stock superficiel, ou réserve facilement utilisable RFU, a une valeur maximale estimée à 50 mm.
- L'évapotranspiration potentielle moyenne sur les bassins a été estimée à partir de nos travaux à 3,3 mm j<sup>-1</sup>. Ainsi la RFU maximale (50 mm) est consommée par évapotranspiration au bout de 15 jours sans précipitations.

Au niveau de l'écoulement, on a simplifié l'analyse faute de connaître dans les chroniques les intensités des averses, en considérant que seules les averses de plus de 50 mm avaient pu donner naissance à un ruissellement suivant les relations établies pour des intensités supérieures à 100 mm h<sup>-1</sup> pendant 30 minutes.

Nous tendons donc arbitrairement à augmenter l'écoulement (et par suite à réduire la ressource parvenant aux nappes, ce qui va dans le sens de la sécurité) en attribuant systématiquement de fortes intensités aux fortes averses.

Les relations établies constituent un ordre d'idée des comportements différents des deux bassins étudiés à S. Nicolau ; P a été remplacé par le terme  $P - (\Delta \text{RFU} + 3,3)$  afin de satisfaire aux priorités de reconstitution du stock de surface et de l'évapotranspiration journalière. Cela revient à réduire un peu l'excès d'écoulement de la proposition précédente.

Le bilan d'un jour de pluie donné peut donc s'écrire :

$$P = (\Delta \text{RFU} + \text{ETR}) + \text{He} + I$$

$\Delta \text{RFU}$  est la variation du stock superficiel entre la valeur de la RFU de la veille et celle du jour considéré jusqu'à concurrence de 50 mm.

ETR vaut 3,3 mm si P est supérieur à 3,3 mm.

He (écoulement) est susceptible d'être observé pour  $P > 50 \text{ mm}$

I (infiltration) constitue la recharge potentielle des nappes après fourniture des autres postes

$$(I = P - \Delta \text{RFU} - \text{ETR} - \text{He}).$$

Les jours sans pluie, la RFU perd 3,3 mm par jour jusqu'à épuisement.

### 1.3. CALCUL DES BILANS DE LA R. BRAVA ET DE LA R. GRANDE SUR LA PERIODE 1978-1983

On a utilisé les chroniques des précipitations journalières des différents postes de chaque bassin et fait pour chaque poste le bilan correspondant, ramené à l'échelle du bassin par pondération des résultats de chaque poste (suivant polygones de Thiessen).

Les hypothèses simplificatrices ne justifiaient pas de faire varier l'évapotranspiration en fonction de l'altitude ; les équations d'écoulement pour les averses supérieures à 50 mm ont été :

- pour R. BRAVA  $\text{He} = 0,68 (P - \Delta \text{RFU} - \text{ETR}) - 15$

- pour R. GRANDE  $\text{He} = 0,25 (P - \Delta \text{RFU} - \text{ETR}) - 12$

Le cumul des différents postes P, He, ETR et par suite I (infiltration) a été effectué pour chaque saison des pluies de la période d'études.

Les tableaux 8.1 et 8.2 donnent les différents paramètres du bilan hydrologique annuel calculés par cette méthode et les valeurs observées pour la même période pour He (et l en considérant que le calcul d'ETR reste valable avec une RFU de 50 mm). Les écarts absolus entre valeurs calculées et valeurs observées sont également indiqués dans les tableaux.

Pour la Ribeira Brava, un écart de près de 50 mm entre le calcul et l'observation apparaît en 1981 pour la lame d'eau infiltrée ; les écarts sont nettement plus modestes les autres années.

Pour la Ribeira Grande, les écarts sont peu importants et le modèle proposé semble validé a posteriori.

Pour les deux bassins, l'observation et le calcul sont très voisins en 1978.

Dans le détail, les choses diffèrent un peu, en particulier pour ce qui est de l'écoulement ; cela n'est pas surprenant au vu des hypothèses simplificatrices que nous avons posées.

Les figures 8.1 et 8.2 montrent pour R. BRAVA et R. GRANDE la comparaison entre événements observés et calculés pour He.

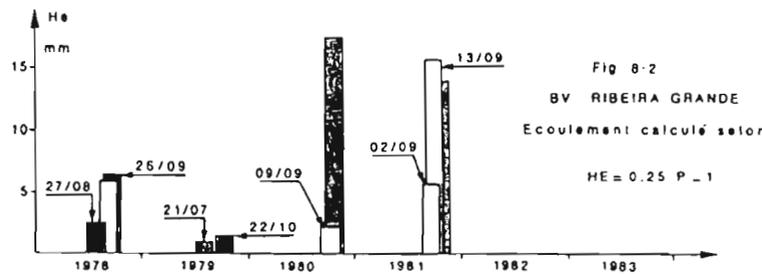
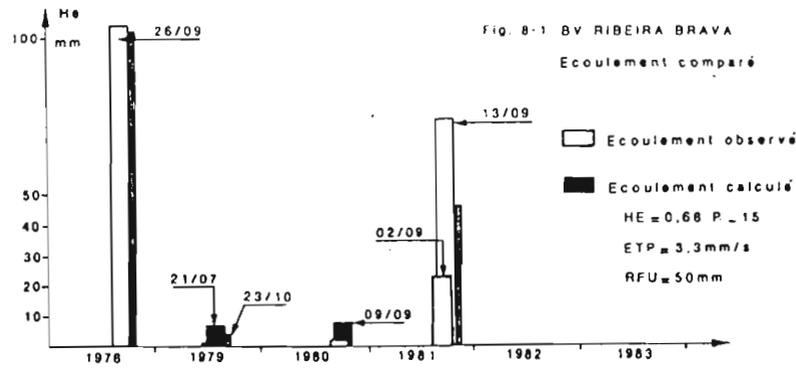
Sur Ribeira Brava, il y a coïncidence en septembre 1978 ; en 1979, l'événement calculé pour juillet est nettement plus fort que celui observé ; le calcul donne une valeur en octobre quand aucun écoulement n'a été observé ; par contre, l'événement du 2 octobre 1981 n'apparaît pas dans le calcul et reste très sous-estimé le 13 septembre 1981.

Tableau 8.1 : BILAN HYDROLOGIQUE SUR LE BASSIN DE LA RIBEIRA BRAVA

SAISON	Lame d'eau précipitée P	ETR	Lame d'eau écoulee He			Lame d'eau infiltrée l		
			CALCULEE	OBSERVEE	ECART	CALCULEE	OBSERVEE	ECART
1978	383.7	237.5	102.1	104.1	+2	44.1	42.1	-2
1979	203.3	140.9	10.6	0.99	-9.6	51.8	61.4	+9.6
1980	284.4	254.4	8.3	1.94	-6.36	21.6	28.0	+6.4
1981	224.7	108.8	46.6	96.4	+49.8	69.3	19.5	-49.8
1982	48.6	48.45	0	0.15	+0.15	0	0	0
1983	18.7	18.7	0	0	0	0	0	0
Moye. 6 ans	193.9	134.8	27.9	33.9		31.1	25.2	

Tableau 8.2 : BILAN HYDROLOGIQUE SUR LE BASSIN DE LA RIBEIRA GRANDE

SAISON	Lame d'eau précipitée P	ETR	Lame d'eau écoulee He			Lame d'eau infiltrée l		
			CALCULEE	OBSERVEE	ECART	CALCULEE	OBSERVEE	ECART
1978	288.4	189.1	10.1	7.0	-3.1	89.1	92.3	+3.2
1979	260.6	149.4	2.5	0	-2.5	108.7	111.2	+2.5
1980	246.7	92.4	18.6	2.39	-16.21	135.7	151.9	+16.2
1981	295.1	161.8	14.1	20.35	+6.25	119.2	112.9	-6.3
1982	83.5	72.9	0	0	0	11.1	10.5	-0.6
1983	79.1	70.3	0	0.55	+0.55	7.8	8.3	+0.5
Moye. 6 ans	208.9	122.7	7.6	5.1		78.6	81.2	



Sur Ribeira Grande, le calcul annonce une crue le 27 août 1978 qui n'a pas été observée ; il y a une bonne coïncidence pour la crue du 26 septembre 1978. En 1979, des événements calculés pour le 21 juillet et le 22 octobre ne sont pas observés. Il y a un grand décalage entre valeurs observées et calculées le 9 septembre 1980. Enfin là aussi, le calcul ne mentionne pas l'écoulement observé le 2 septembre. Ces écarts s'expliquent par les intensités maximales connues de ces événements qui ne vérifient pas les hypothèses de base du modèle.

Dans l'ensemble donc, le modèle a surestimé l'écoulement sur les deux bassins ; cela était annoncé et allait dans le sens de la prudence en minimisant la recharge des nappes.

Celle-ci reste cependant relativement im-

portante pour les deux bassins puisque la moyenne de la lame infiltrée sur 6 ans (avec deux années à recharge faible ou nulle en 1982 et 1983) porte :

sur 25 mm/an sur la R. Brava,  
sur 80 mm/an sur la R. Grande.

La méthode par cumul de bilans journaliers met donc en évidence une recharge des nappes pour des précipitations nettement inférieures aux valeurs limites proposées par des formules de bilan annuel global.

Le facteur ETR est beaucoup plus variable puisqu'il est ici directement lié à la distribution dans la saison des précipitations. Il dépend en outre de la "réserve facilement utilisable".

Le choix d'une valeur de 50 mm pour la RFU décide en fait du stock mis à disposition des besoins de l'évapotranspiration potentielle. Retenir une valeur plus forte revient donc à augmenter ETR et bien évidemment à réduire l'infiltration.

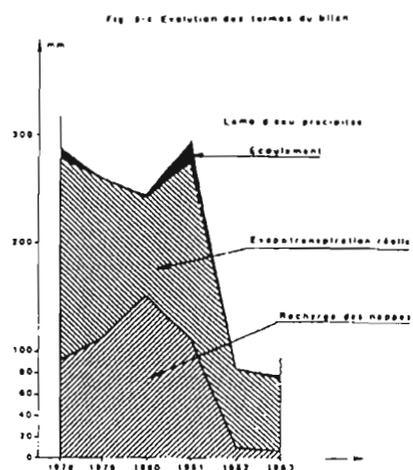
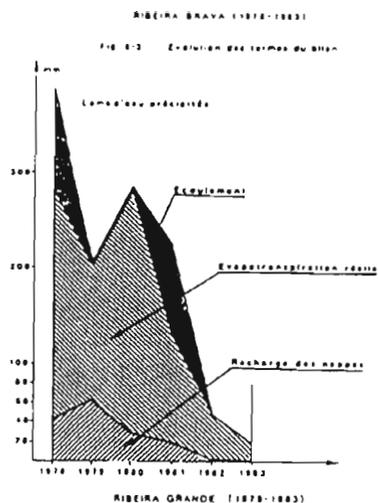
Une RFU de 100 mm -qui ne correspond pas à la morphologie et aux caractéristiques des horizons de surface- reviendrait à supprimer toute recharge sur des bassins du type de la R. Brava.

Mais hydrologues, hydrogéologues et agronomes s'accordent pour retenir une RFU de l'ordre de 50 mm aux îles du Cap-Vert. Les infiltrations indiquées, pour autant qu'elles rejoignent la nappe souvent profonde à travers la tranche aérée correspondraient donc à des valeurs caractéristiques :

- d'un bassin peu perméable comme celui de R. Brava,
- d'un bassin perméable comme celui de R. Grande

dans la gamme de précipitations de ces bassins assez représentatives dans l'archipel.

Les figures 8.3 et 8.4 montrent l'évolution des termes du bilan de 1978 à 1983 sur les deux bassins étudiés. Le tableau 8.3 résume les résultats sur la recharge potentielle des nappes de 1978 à 1983. Le tableau 8.4 compare le cumul des résultats calculés sur 1978-1983. Les différences sont relativement faibles et traduisent un lissage des anomalies dues aux approximations du modèle. Ces



résultats justifient l'extension proposée sur l'ensemble de la chronique pluviométrique.

#### 1.4. ESSAI DE CALCUL DES BILANS SUR LES BASSINS ETUDIÉS A PARTIR DES CHRONIQUES JOURNALIÈRES DE PRÉCIPITATIONS (1945 - 1983).

Sur la période d'observations antérieures à nos études, nous ne disposons pour les bassins étudiés que des postes de VILA da RIBEIRA BRAVA et de CACHACO. Pour ce dernier poste les données journalières ne sont pas connues de 1949 à 1961. Il y a aussi quelques lacunes sur Vila.

	Infiltration moyenne 78-83 en mm	Volume d'eau moyen annuel infiltré en m <sup>3</sup>	% de pluie infiltrée pendant la période 78-83
R. BRAVA	25.2	175700	13
R. GRANDE	81.2	877670	38

Tableau 8.3: La recharge des nappes pour la période 78-83

	Total Infiltration calculée (en mm)	Total infiltration observée (mm)	% d'erreur total du calcul
R. BRAVA	186.6	151	+ 23
R. GRANDE	471.6	487.1	- 3

Tableau 8.4 : Comparaison entre les résultats du calcul et les observations de l'infiltration cumulée sur 1978-1983

Pour le bassin de la R. BRAVA, le calcul du bilan s'est fait à partir des deux stations (avec un coefficient de correction pour Vila en cas de lacune sur Cachaço).

Pour le bassin de la R. GRANDE, le calcul du bilan n'a été possible que pour les années disponibles.

Les résultats de cette approche du bilan suivant le modèle proposé sont résumés dans les tableaux 8.5 et 8.6.

Les figures 8.5 et 8.6 illustrent les variations des termes du bilan ainsi déterminés.

Pour la R. BRAVA, la figure 8.5 met en évidence une première période de 1945 à 1965 humide avec une bonne recharge des nappes, suivie de la période actuelle avec les

déficits que l'on connaît. Le schéma de la R. GRANDE, quoique incomplet, est très voisin.

L'étude de la distribution des lames d'eau infiltrées montre que l'on a sur la période 1945 - 1983, sur R. BRAVA une moyenne de 58,2 mm par an avec un écart-type de 76 mm (39 ans).

Sur les 25 ans de R. GRANDE, la moyenne est de 78,4 mm avec un écart-type de 86,3 mm. Sur la même période de 25 ans, la moyenne de l sur R. BRAVA tombe à 48,9 mm. Le rapport des deux bassins sur 25 ans est de 1,76 alors que sur la période observée de 1978 à 1983 il est de 3,22. Cela signifie que le bassin de la R. BRAVA est plus sensible aux périodes déficitaires pour lesquelles la recharge des nappes chute considérablement. Sur l'ensemble de la période, l'infiltration de Ribeira GRANDE pourrait être de l'ordre de 100 mm.

Tableau 8.5 : TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE (avec RFU = 50 mm)

ANNEE	RIBEIRA GRANDE				RIBEIRA BRAVA			
	P	I	He	ETR	P	I	He	ETR
1945	788.5	284.4	4.9	499.2	500.0	284.4	4.9	210.7
1946	253.1	37.0	0	216.1	195.7	37.0	0	158.7
1947	394.1	141.9	1.1	251.1	245.5	74.9	1.1	169.5
1978	306.0	111.8	0	194.2	203.7	55.9	0	147.8
1949	317.5	79.4	0	238.1	278.1	51.7	4.3	222.0
1950	-	-	-	-	726.3	174.7	102.6	449.0
1951	-	-	-	-	248.2	40.1	34.6	173.5
1952	-	-	-	-	753.8	317.12	159.5	277.1
1953	-	-	-	-	454.6	159.6	21.6	273.4
1954	-	-	-	-	246.4	53.2	0	193.2
1955	-	-	-	-	297.3	0	0	297.3
1956	-	-	-	-	683.7	64.4	10.6	608.7
1957	-	-	-	-	411.6	30.0	0	381.6
1958	-	-	-	-	477.7	126.6	11.1	345.0
1959	-	-	-	-	86.4	0	0	86.4
1960	-	-	-	-	243.9	40.9	29.4	173.0
1961	631.1	211.2	6	413.0	520.6	139.4	9.8	371.4
1962	599.6	231.7	8.5	359.4	401.2	115.8	8.5	276.9
1963	-	-	-	-	396.3	43.7	33.7	318.9
1964	167.4	0	0	167.4	214.4	28.9	24.3	161.2

l'ensemble de la période, l'infiltration de Ribeira GRANDE pourrait être de l'ordre de 100 mm.

La distribution statistique montre que l'on a une recharge nulle :

- sur R. BRAVA tous les 3,7 ans
- sur R. GRANDE, tous les 5,7 ans. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 8.7

Tableau 8.6 : TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE (avec RFU = 50 mm) (suite)

ANNEE	RIBEIRA GRANDE				RIBEIRA BRAVA			
	P	I	He	ETR	P	I	He	ETR
1965	155.1	-	0	155.1	165.5	5.5	0	160
1966	-	-	-	-	165.0	0	0	165
1967	-	-	-	-	217.5	0	0	217.5
1968	74.0	0	0	74.0	74.5	0	0	74.5
1969	274.0	99.3	7.2	165.7	211.5	71.0	3.6	136.9
1970	221.0	36.7	0	184.3	164.5	27.1	0	137.4
1971	22.0	19.7	0	202.3	149.1	9.9	0	139.2
1972	19.1	0	0	19.1	10.5	0	0	10.5
1973	174.8	9.3	0	165.5	140.9	5.4	0	135.5
1974	96.9	0	0	96.9	54.2	0	0	54.2
1975	395.6	211.2	11.7	172.7	367.0	164.5	5.9	196.6
1976	94.1	0	0	94.1	57.1	0	0	57.1
1977	129.1	0	0	129.1	95.1	0	0	95.1
1978	288.4	92.3	7.0	189.1	383.7	42.1	104.1	237.5
1979	260.6	111.2	0	149.4	203.3	61.4	1.0	140.9
1980	246.7	151.9	2.4	92.4	284.4	28.1	1.9	254.4
1981	295.1	112.9	20.4	161.8	224.7	19.5	96.4	108.8
1982	83.5	10.6	0	72.9	48.6	0	0.2	48.4
1983	79.1	8.3	0.5	70.3	18.7	0	0	18.7

Infiltration I (RFU : 50 mm)	1978-1983	25 ans (sans 1950-1960)	39 ans
R. BRAVA	25,2	48,9	58,2
R. GRANDE	81,2	78,4	(100)

Tableau 8.7 : Infiltration moyenne annuelle avec une R.F.U. de 50 mm :

- a) sur la période d'observation hydropluviométrique
- b) sur la période d'observation pluviométrique commune aux deux bassins
- c) sur la période d'observation à R. Brava.

Fig. 8-5

BILAN HYDROLOGIQUE (1945-1983)

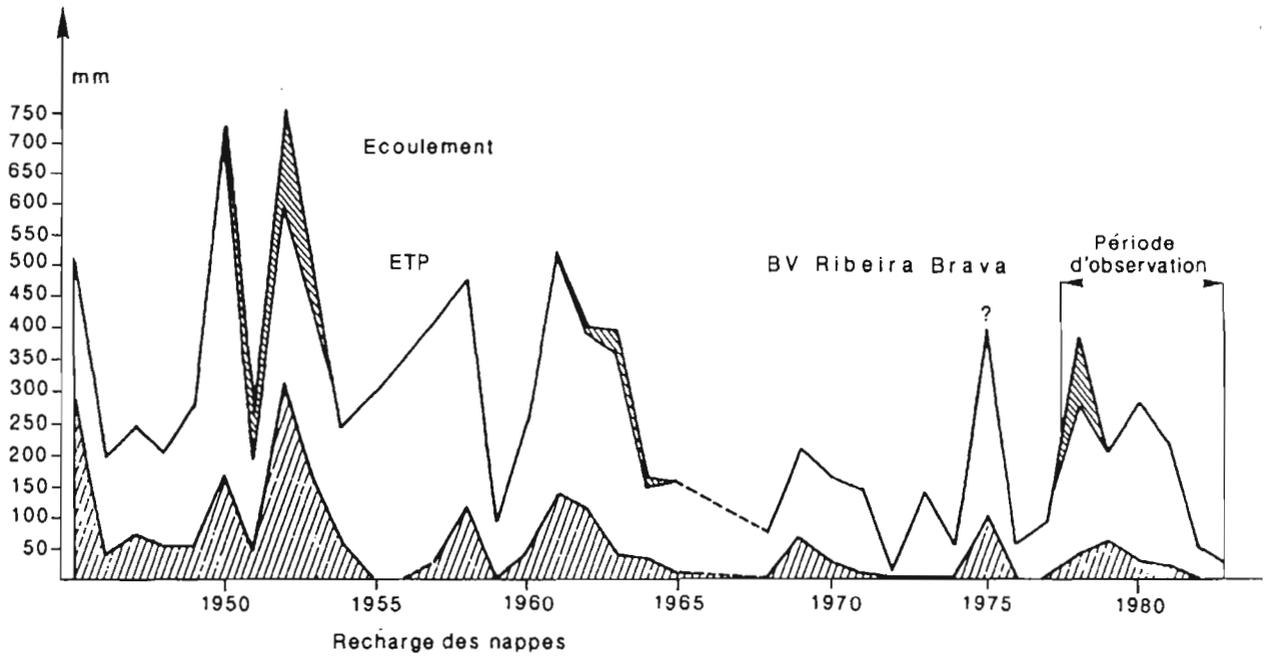
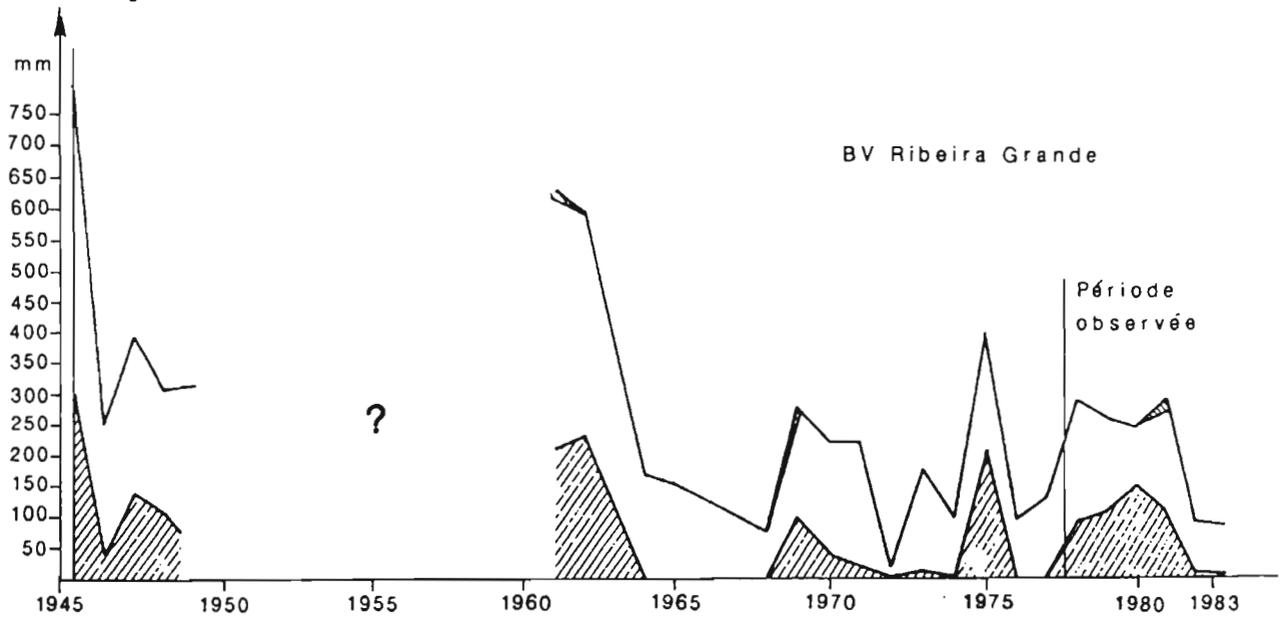


Fig. 8-6

BILAN HYDROLOGIQUE (1945-1983)



## 1.5. CONCLUSIONS SUR L'ETUDE DES BILANS :

Les résultats de cette étude de bilan, délibérément orientés sur le paramètre infiltration et la recharge des nappes doivent être considérés avec beaucoup de prudence. Nous avons déjà souligné les approximations qui ont été faites sur le plan des relations "écoulements-précipitations" ; on peut y ajouter l'imprécision de la distribution spatiale des paramètres hydropluviométriques. Le poids du paramètre ETP - représenté par une valeur unique sur l'ensemble des bassins pour la saison des pluies (3.3 mm), et par suite très approximatif - est cependant secondaire dans l'équation du bilan. Par contre, le choix d'une RFU unique de 50 mm est très arbitraire, même s'il correspondait à la seule opportunité que nous ayons eue en absence de mesures pédologiques. Il va de soi que l'appréciation qui a été faite commande les résultats de l'infiltration. Celle-ci deviendrait pratiquement nulle -on l'a déjà dit- pour une RFU de 100 mm. Enfin, des variations spatiales de RFU sur les bassins peuvent localement augmenter l'infiltration, ailleurs la diminuer. Dans tous les cas, le calcul rendrait compte dans le modèle de ces variations. Il est cependant peu probable que l'on s'écarte

beaucoup des valeurs qui ont été proposées.

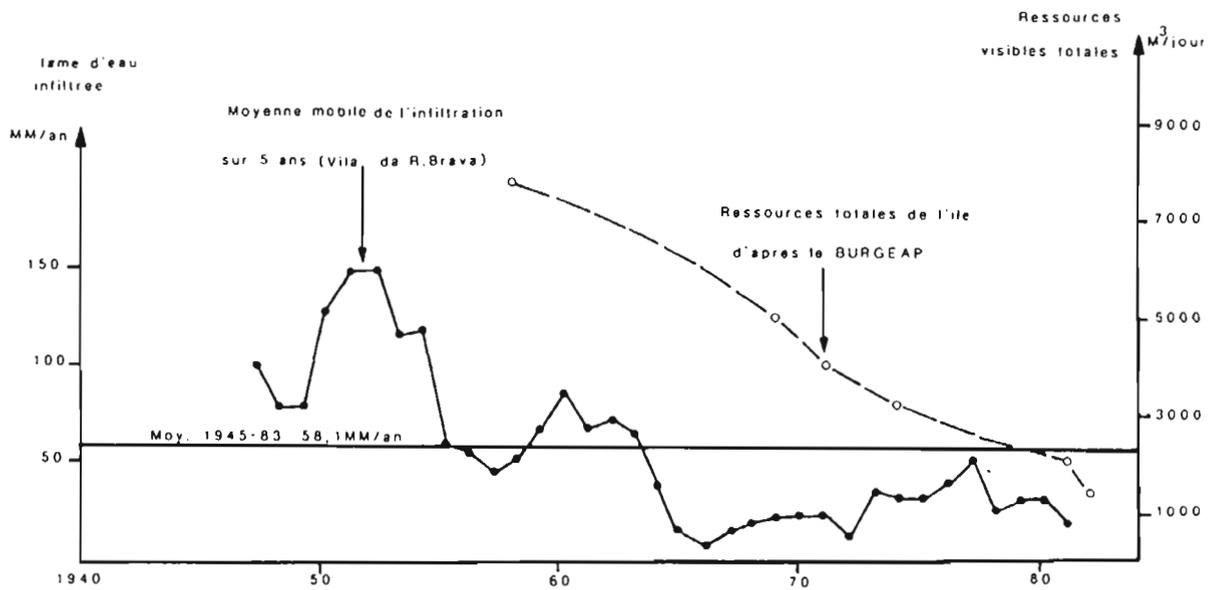
Il faut souligner que ces valeurs moyennes traduisent, en tout état de cause, une réalimentation des nappes dérisoire.

A l'échelle de l'année, lorsque la zone aérée de l'aquifère est importante, la lame d'eau infiltrée ne participe pas immédiatement à la recharge des nappes. Cela est d'autant plus sensible que l'on se situe dans un long épisode sec comme celui des années 70-80.

Dans la figure 8.7., on a comparé l'évolution des ressources totales de l'île de São Nicolau estimée par le BURGEAP aux variations de l'infiltration (moyennes mobiles sur 5 ans). La baisse des ressources correspond bien à celle de la recharge estimée des nappes. La correspondance s'arrête là puisque le faible niveau des infiltrations depuis le milieu des années 60 reste relativement stable alors que le tarissement des aquifères se poursuit de manière dramatique. Nous donnons plus loin un aperçu de ces ressources souterraines mais nous rappellerons ici que les termes du bilan qui ont été définis ici ne peuvent être traduits en volumes au niveau des aquifères exploités ou exploitables que si leur zone d'alimentation est connue.

Fig. 8-7

EVOLUTION DE LA LAME D'EAU INFILTREE  
ET DU DEBIT GLOBAL DES SOURCES ET CAPTAGES



## 2. L'ETAT DES RESSOURCES SOUTERRAINES :

En abordant ce domaine, largement étudié par le BURGEAP et dont l'exploitation a constitué une des actions programmées majeures du Ministère Français de la Coopération, du BURGEAP et du MDR (voir chapitre 2), nous n'avons d'autre ambition que de rendre compte en liaison avec l'étude hydrologique qui a précédé, de l'extrême précarité de la ressource souterraine.

### 2.1. EVOLUTION DU DEBIT DES SOURCES

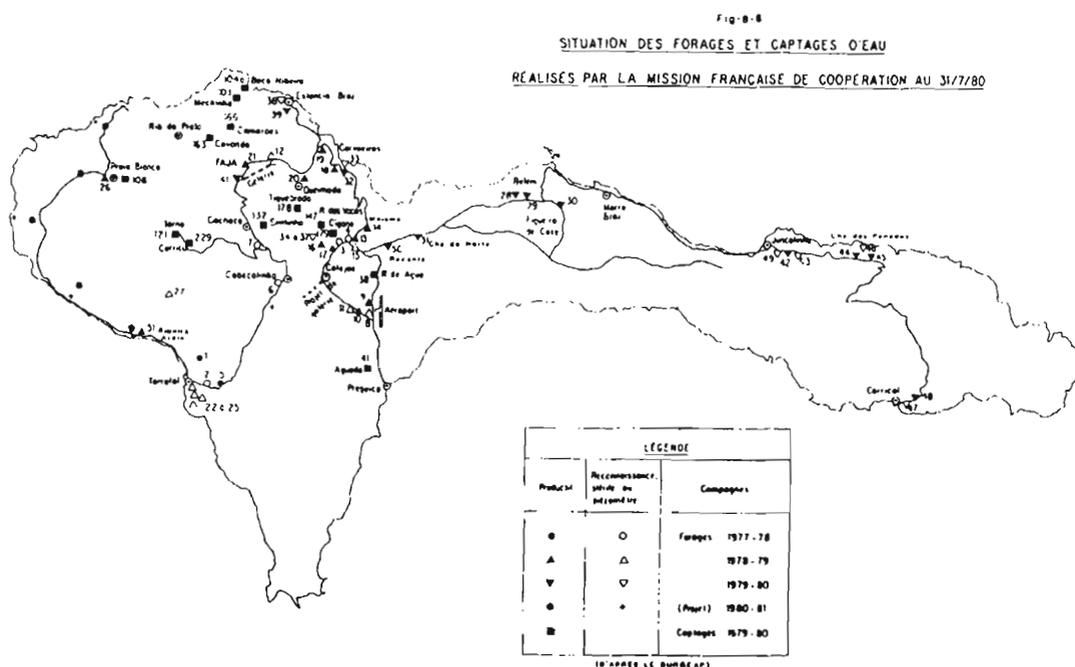
La carte de la figure 8.8 situe les principaux points d'eau étudiés par le BURGEAP. Au total 250 points d'eau (sources, captages, puits etc.) ont été répertoriés. La plupart d'entre eux sont en cours de tarissement ou même taris ;

les débits diminuent ou le niveau des nappes s'effondre.

A l'exception des sources littorales, on observe sur les émergences naturelles des débits faibles et irréguliers. En 1980, l'écoulement varie de 70 m<sup>3</sup>jour<sup>-1</sup> à seulement 1m<sup>3</sup>jour<sup>-1</sup>.

Dans les Ribeiras Queimada et Brava, ce sont généralement des sources de trop plein qui déversent leur eau au contact du complexe ancien et des coulées intermédiaires.

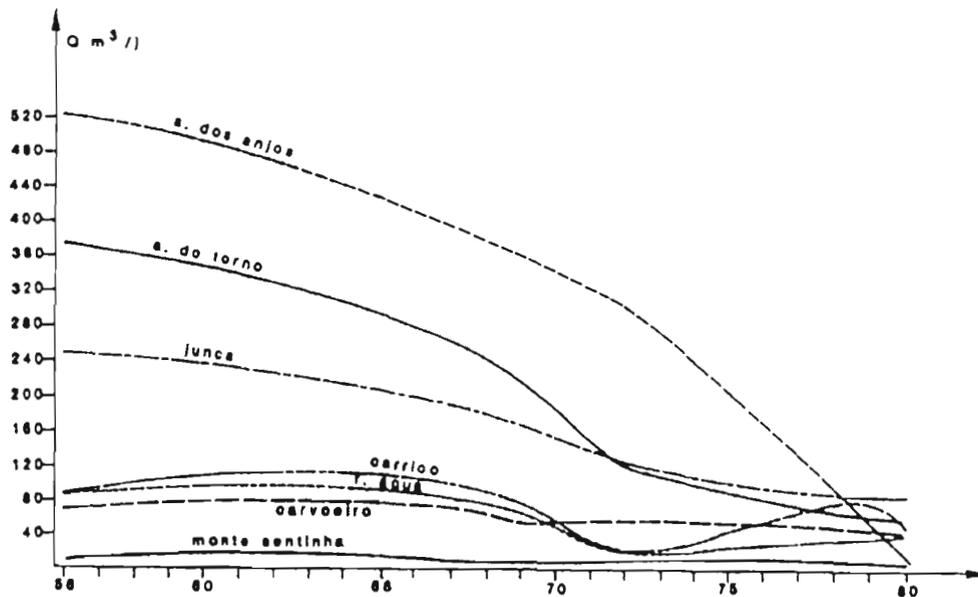
Les sources de PRAIA Branca, de R. da Prata et dos Camaroes proches du substratum ne donnent qu'un débit modeste ; l'essentiel de l'écoulement souterrain se déverserait dans la mer. Quant aux sources d'altitude (versant Sud-Ouest du Monte Gordo) qui apparaissent



au contact des lapillis et tufs (Agua do Torno), elles sont liées à un réservoir d'extension limitée et leur substratum n'a sans doute pas une continuité et une étanchéité suffisante pour éviter qu'un écoulement assez important ne subsiste en profondeur vers l'aval (Tarrafal).

Les ressources inventoriées des sources et captages de l'île étaient estimées à 4800 m<sup>3</sup>jour<sup>-1</sup> en 1956 (BURGEAP op cit). En 1972, elles s'étaient abaissées à moins de 1800 m<sup>3</sup>jour<sup>-1</sup> et continuent à décroître. La fig. 8.9. montre ce tarissement dangereux pour différents captages et sources de l'île.

Fig. 8-9 DEBITS MOYENS JOURNALIERS(56-80)DES PRINCIPALES SOURCES DE SAO NICOLAU



Les sources d'Agua dos Anjos et de Agua do Torno, ont accusé des baisses de débits phénoménales passant de 520 m<sup>3</sup>jour<sup>-1</sup> en 1956 à 2 m<sup>3</sup>jour<sup>-1</sup> en 1983 pour Agua dos Anjos.

Par contre, certaines sources aux débits très faibles comme celles de Carvoeiros ou de Monte Sentinha n'ont pratiquement pas évolué depuis 1956.

Dans le détail du suivi des débits des sources effectué depuis 1979 en collaboration avec le MDR et le BURGEAP, on peut identifier deux types de régime hydrogéologique (fig. 8.10 et 8.11).

Les sources nées de l'écoulement dans les basaltes présentent des débits réguliers et peu élevés au cours de l'actuelle période déficitaire.

Fig. 8-10 COURBES DES DEBITS MENSUELS (79-82) DES SOURCES  
S'ALIMENTANT DANS LES BASALTES

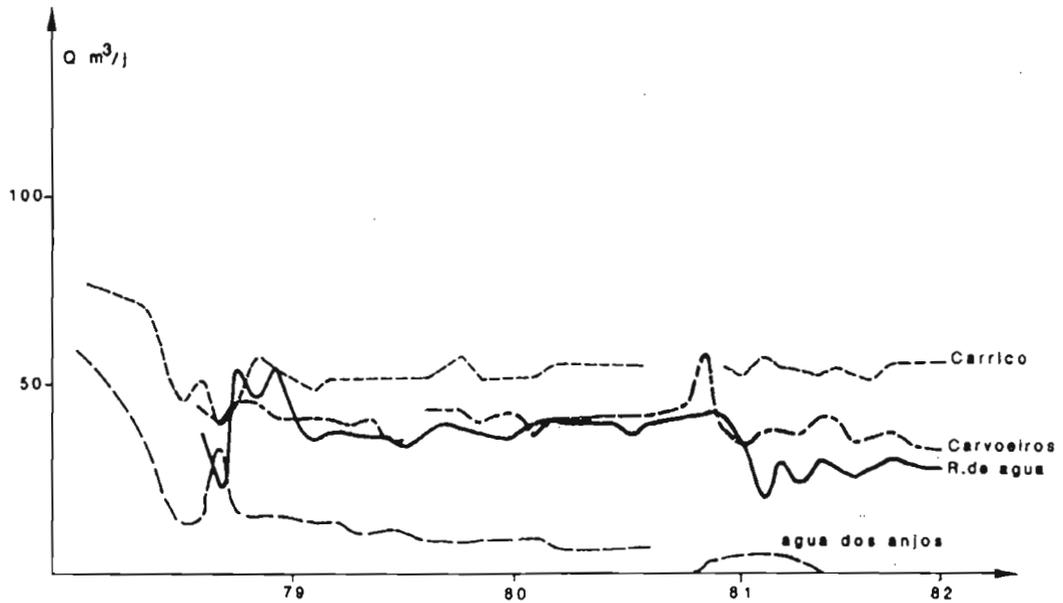
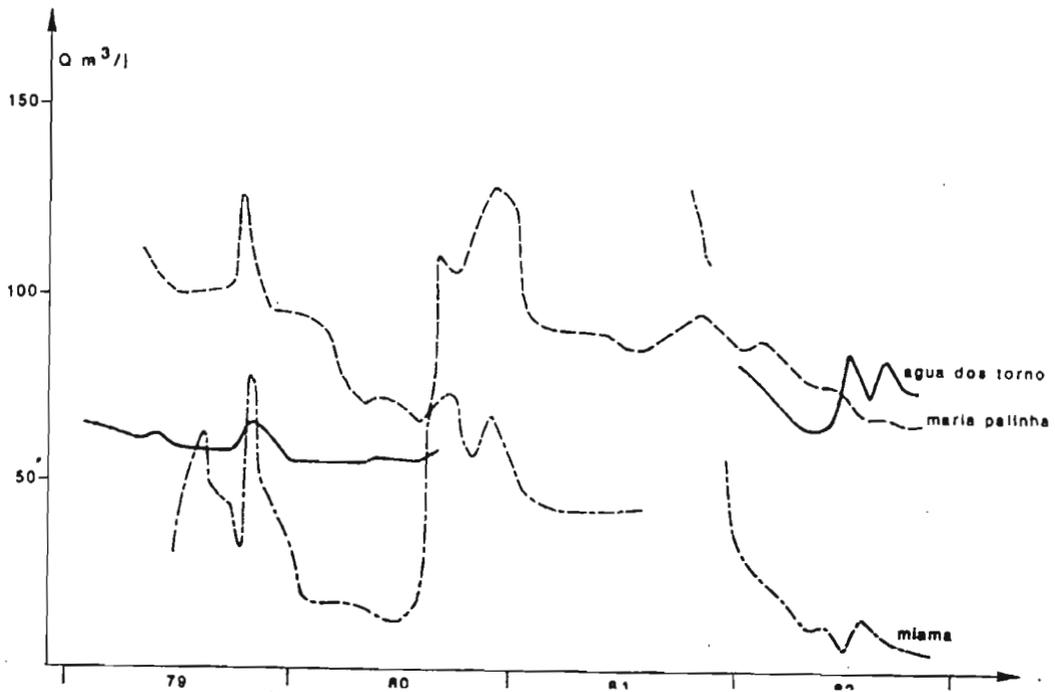


Fig. 8-11 DEBITS MENSUELS (79-82) DES SOURCES S'ALIMENTANT DANS LES ALLUVIONS ET LAPILLIS



Ce sont des sources de basse altitude qui sont alimentées par les écoulements souterrains de l'amont, l'écoulement étant en partie perdu dans la mer du fait de l'enfoncement du complexe ancien (CA).

Les sources s'alimentant dans les alluvions et lapillis présentent des débits saisonniers plus importants et présentent de bonnes réponses aux épisodes pluvieux. En période de crue elles dépassent actuellement des débits de  $100 \text{ m}^3\text{jour}^{-1}$ .

Deux unités hydrogéologiques intéressent plus particulièrement cette étude et illustrent bien le fonctionnement hydrologique des aquifères et en particulier leur apauvrissement.

## 2.2. LA NAPPE DE CAMPO DA PREGUIÇA

En bordure orientale du bassin de la Ribeira Brava, l'aquifère de cette nappe, constitué de coulées de lave récentes, est limité par des formations semi-imperméables à imperméables du complexe ancien et de la série intermédiaire. L'alimentation est du type vertical sur le plateau de Preguiça et se fait également par infiltration sur les pentes du Monte Luis Alfonso. Cet aquifère paraît bien délimité et son exutoire principal est la source de Ribeira Agua à une altitude de 110 m (amont de la R. Seca), un écoulement secondaire paraissant probable vers Preguiça au Sud.

La source de Ribeira Agua est caractérisée par une amplitude saisonnière peu importante. La courbe des débits est régulière à l'exception de quelques réactions de crue ne dépassant pas  $2 \text{ à } 3 \text{ m}^3\text{jour}^{-1}$  supplémentaire.

Il y a une franche diminution de débits en fin d'année 81 qui se stabilise à son niveau minimum par la suite, années 82-83.

L'observation de la courbe des débits sur une longue période 56-80 (voir figure 89) fait apparaître un pseudo-cycle dans la variation des débits où le minimum se situe en 72 et le maximum en 64. Ceux-ci correspondent aux fortes et faibles années pluvieuses.

La loi de tarissement est généralement exponentielle ; elle s'écrit

$$Q_t = Q_0 e^{-a(t-t_0)} / Q_t, Q_0 \text{ en } \text{m}^3\text{s}^{-1},$$

a, coefficient de tarissement, t en jours.

La courbe moyenne de tarissement de Ribeira Agua présente une inflexion en 69. Ce n'est pas une inflexion démesurée mais le signe malgré tout d'une accentuation de son régime de vidange. Le coefficient de tarissement est de  $2.03 \cdot 10^{-5}\text{jour}^{-1}$  pour la période 1956-1969 et de  $7.11 \cdot 10^{-5}\text{jour}^{-1}$  pour la période actuelle.

L'exploitation de cette nappe par des forages équipés de pompe AERO-WATT (FN9 et FN10) (1) va modifier très rapidement ses caractéristi-

---

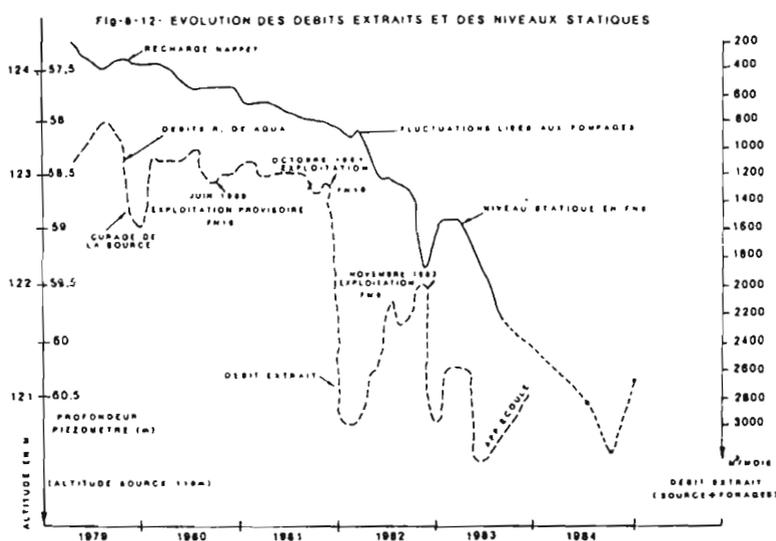
(1) Aérogénérateurs pouvant fournir  $5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  en débit de pointe et  $70 \text{ m}^3\text{jour}^{-1}$  en débit moyen.

ques. Un piézomètre (FN8) suit le niveau statique de la nappe. Son observation met en évidence la faible réalimentation de la nappe. Avant la mise en exploitation des forages suscités, nous observons une baisse de niveau régulière de 4,4 cm/mois ou encore de 2 cm/1000 m<sup>3</sup> écoulés. C'est la conséquence du débit écoulé de la source de Ribeira Agua et autres petits exutoires. Ce débit était de 1200 m<sup>3</sup>mois<sup>-1</sup> ou de 26.400 m<sup>3</sup> pour la période précédant la mise en service des forages.

A partir de la mise en exploitation des forages FN9 et FN10 (octobre 81 puis novembre 82), nous constatons une accélération de la vidange de l'aquifère par une baisse des niveaux de 6,5 cm/mois ou de 2,6 cm/100 m<sup>3</sup> extraits. Le débit de Ribeira Agua évolue dans le même sens passant de 1200 m<sup>3</sup>mois<sup>-1</sup> à 850 m<sup>3</sup>mois<sup>-1</sup> en 1984 (-30%) ; les débits d'exploitation des forages peuvent alors aller jusqu'à près de 2000 m<sup>3</sup>mois<sup>-1</sup>.

Il apparaît clairement sur le graphe de la figure 8.12 que la mise en exploitation des forages a accentué d'une manière non négligeable la vidange montrant ainsi le faible pouvoir de recharge du réservoir.

Cette situation -et les résultats d'analyses isotopiques (cf. 3.2.2.) mettant en évidence une absence de renouvellement des eaux de l'aquifère- a bien évidemment alerté les responsables de l'exploitation des forages 9 et 10 de Campo da Préguiça. Le BURGEAP a calculé qu'avec un débit moyen d'exhaure de 1600 m<sup>3</sup>.mois<sup>-1</sup>, la durée d'exploitation n'excéderait pas 5 ans sur le forage FN9, 3 ans sur le forage FN10 ; elle pourrait être encore doublée par descente des pompes de 4 à 5 mètres, soit 10 ans au maximum, mais il faut savoir que la charge entre le niveau statique de la nappe et la côte de la source R.da Agua sera alors à peu près nulle, ce qui revient à tarir celle-ci.



En conclusion s'il n'y a pas réalimentation importante, la pérennité de cette ressource implique de réduire considérablement les débits exploités et peut-être de les réserver à l'alimentation de Vila plutôt qu'à une irrigation intensive des périmètres de Campo da Preguiça.

### 2.3. LA NAPPE DE LA VALLEE DE FAJA

Le bassin de FAJA est constitué par une vallée ancienne, taillée par l'érosion dans les formations volcaniques de la série intermédiaire et complétée en partie, ultérieurement, par une

succession de coulées plus récentes sur une épaisseur totale de l'ordre de 200 mètres.

La morphologie de l'ancienne vallée fossile peut être obtenue approximativement en extrapolant sous les coulées récentes les pentes des versants (MPA), et on obtient alors des profils en long et en travers analogues à ceux des vallées voisines.

Seule la partie la plus haute du bassin versant, recouverte par les lapillis du Monte Gordo, présente des indéterminations importantes sur l'extension du bassin versant hydrogéologique vers le sud (fig. 8.13).

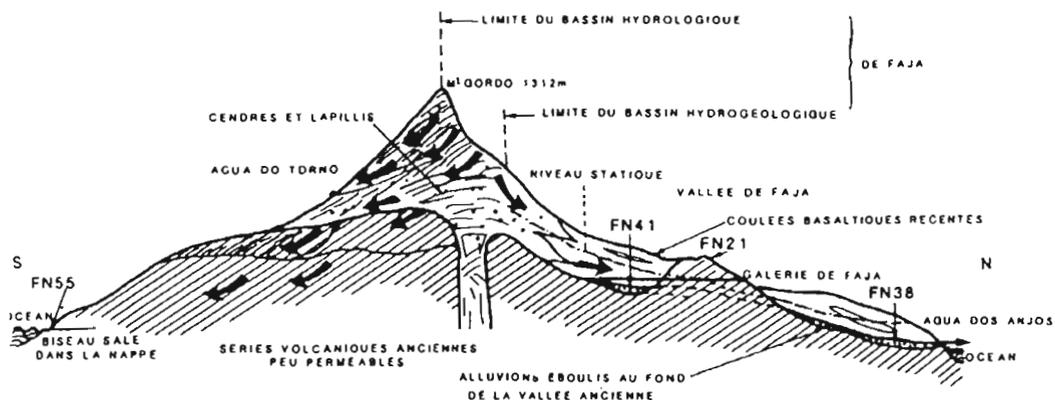


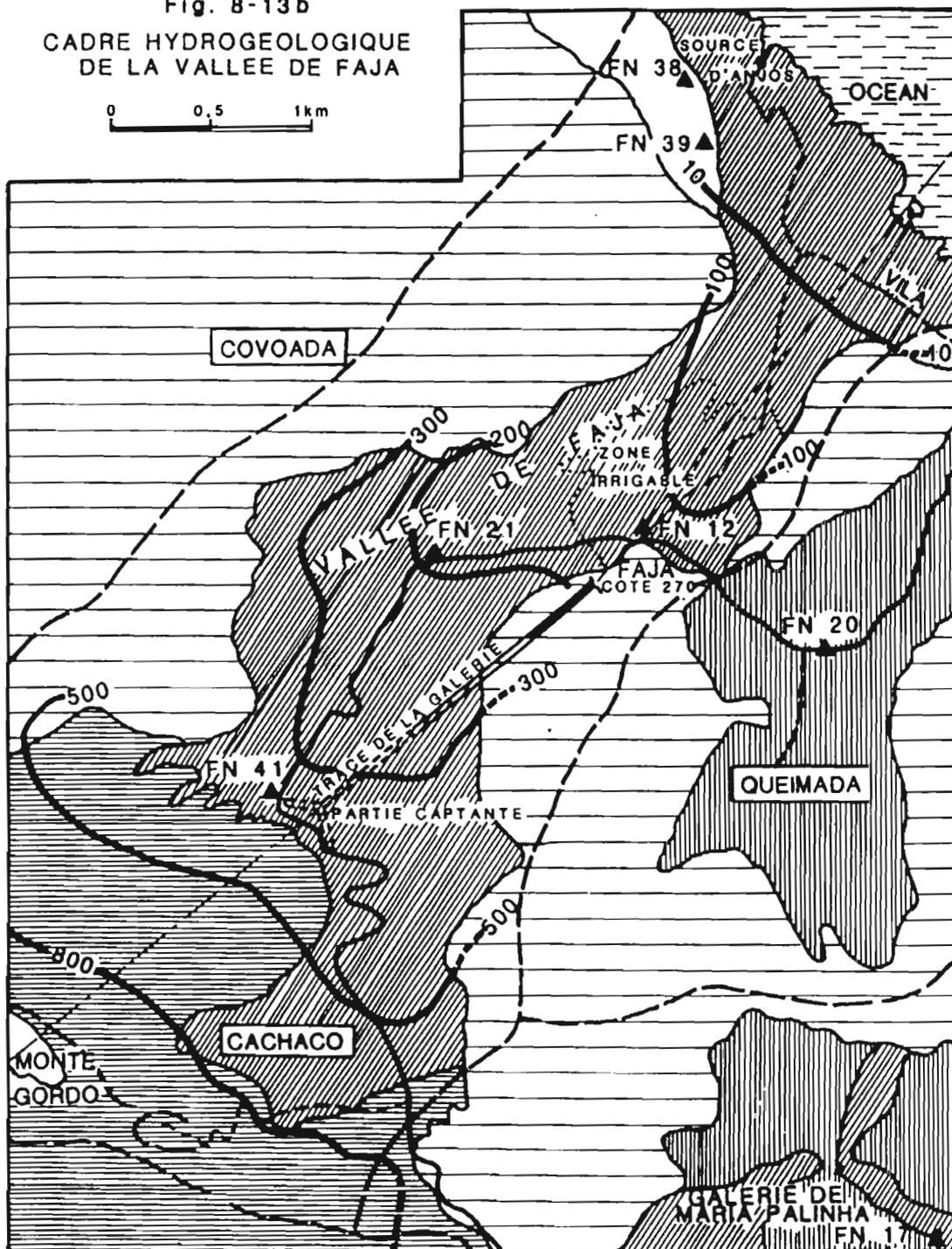
Fig. 8-13a COUPE N-S PASSANT PAR LE MONTE GORDO

Une nappe aquifère, profonde de 120 à 170 mètres, s'écoule au fond de la vallée fossile dans les basaltes récents et les alluvions ou éboulis sous-jacents.

Cette nappe a été rencontrée dans les trois forages réalisés par la mission (BURGEAP-78-79) (FN 12, FN 21, FN 41).

Il est ainsi possible de tracer approximativement une carte piézométrique sur toute la vallée en aval de l'altitude 500 m (forage FN 41). La largeur de la section mouillée probable dans les formations récentes est de l'ordre de 300 mètres ; sa hauteur pourrait être de l'ordre de 50 mètres dans l'axe de la vallée.

Fig. 8-13b  
 CADRE HYDROGEOLOGIQUE  
 DE LA VALLEE DE FAJA



----- TRACE DE LA COUPE  
 FN 20▲ FORAGE DE RECONNAISSANCE

- - - - LIMITE DE BASSIN TOPOGRAPHIQUE

~~~~~ 100 SURFACE DE LA MAPPE DANS LA VALLEE (m)

-  ALLUVIONS ET EBOULIS\*
  -  CENDRES ET LAPILLIS
  -  COULEES RECENTES (MA)
  -  COULEES ANCIENNES (MPA)
  -  SERIE DE BASE IMPERMEABLE (CA)
- (D'APRES LE BURGEAP)

Au droit du FN 21, l'écoulement dans les coulées récentes serait de l'ordre de 1200 m<sup>3</sup>jour<sup>-1</sup> (BURGEAP)

- transmissivité  $T = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
- largeur moyenne  $l = 250 \text{ m}$
- pente  $i = 5\%$
- débit  $Q = T \cdot L \cdot i = 14 \text{ l/s}$

Au débit précédent qui s'écoule dans les coulées récentes, doit être ajouté le débit qui circule dans les épontes, mais dont l'évaluation directe est impossible.

A l'aval de cet aquifère, près d'Estancia Braz et pratiquement au niveau de la mer au débou-

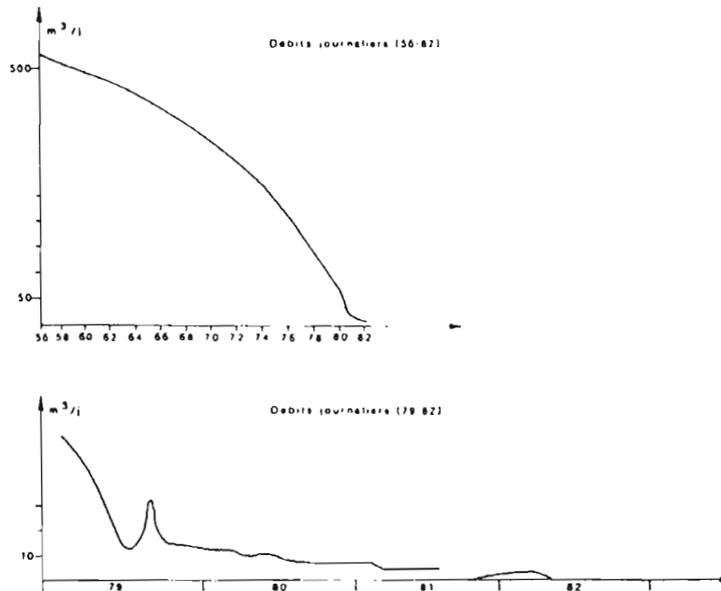
ché de la Ribeira Grande, la source d'Agua dos Anjos constitue son seul exutoire aérien.

Elle se situe à une altitude de 10 m au-dessus du niveau de la mer dans les coulées récentes de laves.

Les variations de débit ont été suivies à partir de 1956 jusqu'en 1983 (dernières données à jour). Ces données nous permettent d'émettre un jugement sur le fonctionnement de l'aquifère et son état actuel.

La figure 8.14 présente les variations de débits d'Agua dos Anjos.

FIG. 8-14 AGUA DOS ANJOS



La courbe des débits met en évidence depuis 1977 un tarissement très rapide de la source ; entre 1957 et 1983, les débits journaliers

passent de 520 m<sup>3</sup>jour<sup>-1</sup> à 1, voire 0 m<sup>3</sup>jour<sup>-1</sup> en 1983. La courbe des débits mensuels (79-83) est lisse mis à part le curage réalisé en août 1979.

C'est la courbe caractéristique d'un grand réservoir avec une perméabilité peu importante.

Il faut rappeler que l'aquifère est de nature basaltique récente (coulées récentes) poreux (porosité de fissures). Les niveaux statiques de la nappe de Faja mesurés en 1980 se situent en moyenne à 100 m au-dessous de la surface, ce qui ne facilite pas le cheminement de la lame infiltrée dans la zone aérée.

La réponse de la source aux grandes pluies est très faible, il y a absence de pointe dans la courbe de Q mensuels, pointe correspondant à une éventuelle recharge de l'aquifère.

D'après le bilan réalisé sur le bassin de Ribeira GRANDE, on observerait des infiltrations de plus de 50 mm en moyenne par an, infiltrations qui ne sont pas ressenties au niveau du débit de la source au cours de ces dernières années.

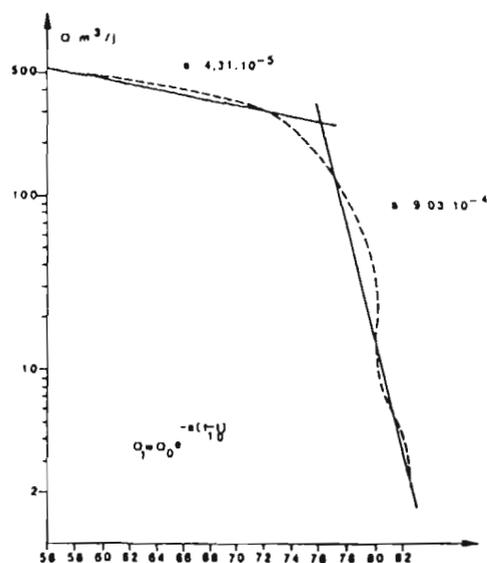
Rappelons que l'eau d'infiltration du bassin hydrologique ne se concentre pas entièrement dans l'aquifère de la vallée fossile mais s'écoule souterrainement aussi vers d'autres bassins, notamment dans la partie haute du bassin de la Ribeira GRANDE.

On s'aperçoit par exemple, à la vue des coupes stratigraphiques du Monte GORDO, que le pendage des couches conduit l'eau tombée sur le bassin de Ribeira GRANDE sur le versant sud du MONTE GORDO (source d'Agua do Torno). Cette source dont l'aquifère est

constitué essentiellement de produits pyroclastiques a une réponse plus marquée aux fortes précipitations que Agua dos Anjos (cf. fig. 8.11).

Pour revenir à la source d'Agua dos Anjos dont l'aquifère paraît bien délimité au moins sur ses bordures, on a étudié la courbe d'évolution des débits. La période pluviométrique déficitaire quasi-continue depuis le milieu des années 60 a induit une phase de tarissement de la nappe reproduite dans la figure 8.15. Deux périodes apparaissent nettement. Le point d'inflexion se situe en 1976 et correspond à une accentuation importante du tarissement. L'ajustement de deux droites de tarissement, (en graphique semi-logarithmique) correspondant aux deux périodes mises en évidence, de fait suivant la relation exponentielle déjà citée.

FIG. 8-15 COURBE DE TARISSEMENT  
AGUA DOS ANJOS



Le coefficient de la période 1956-1976 est de  $4,31 \cdot 10^{-5} \text{ jour}^{-1}$ ,

celui de la période actuelle 1976-1983 est de  $9,03 \cdot 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$ .

L'accélération de la vidange de la nappe peut s'interpréter dans le fléchissement de cette courbe comme une variation considérable du réservoir : passage d'un grand réservoir (coulée récente de FAJA) à un réservoir sous-jacent de dimension beaucoup plus limitée (Fond de thalweg) ou encore présence d'un seuil partageant la nappe en deux et coupant la partie aval de sa partie amont). Le seuil existe et la galerie drainante de FAJA (cf. ch. II) creusée par le BURGEAP, tendait à récupérer les ressources amont pour irrigation gravitaire de plaines aval.

L'inflexion de la courbe de tarissement peut traduire aussi un changement de perméabilité du réservoir. La nappe n'est plus présente dans les basaltes mais seulement dans le fond de la vallée fossile, baisse consécutive à une réalimentation minimum durant les années 60 et 70, c'est à dire, dans les alluvions et éboulis du MPA (perméabilité plus grande) mis en place avant les coulées récentes. Cette augmentation de perméabilité entraîne une vidange de la nappe beaucoup plus rapide.

Une baisse de niveau de la nappe entraîne celle-ci dans un matériau plus grossier et donc plus perméable.

Trois forages ont été mis en exploitation en août 80 (FN 41, 21, 39) extrayant un débit total de  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{jour}^{-1}$ . C'est un débit important face au débit d'écoulement normal de l'aquifère (Q apparent). On observe une baisse de 38% du Q de la source pendant cette période, consécutive au pompage.

Depuis la mise en service de la galerie de FAJA ( $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{jour}^{-1}$ ), une bonne partie des ressources de l'aquifère sont en exploitation. La situation critique de la nappe sur le plan de l'alimentation ne permet pas d'espérer une amélioration de la ressource et donc des potentialités d'exploitation.

Les pertes en mer probables indiquées par le BURGEAP concernent des volumes certainement plus importants que ceux qui sont exploités par les captages et aménagements opérationnels à São Nicolau mais elles doivent être suffisamment diffuses pour échapper à toute perspective d'exploitation (1).

---

(1) Ces pertes en mer étaient d'évidence si peu importantes qu'elles n'ont pu être "reniflées" par les campagnes de thermographie aérienne des eaux marines côtières.

### 3. LA QUALITE DES EAUX A SAO NICOLAU

#### 3.1. LES ANALYSES CHIMIQUES

L'ORSTOM a procédé aux prélèvements et aux analyses d'un certain nombre d'échantillons recueillis principalement sur les eaux souterraines. Ces mesures complètent la connaissance de la chimie des eaux abordée par le BURGEAP dans ses études antérieures et situent la composition minérale de ces eaux dans le contexte déficitaire que l'on connaît.

Les tableaux 8.8. et 8.9. donnent les résultats des analyses effectuées sur différentes sources, captages et forages dont les numéros se rapportent à la carte de situation (fig. 8.8.)

FN 2 : Tarrafal ; FN 8 : Preguiça  
FN 22 : Tarrafal ; FN 24 : Tarrafal  
FN 33 : Carvoeiros ; FN 38 : Preguiça  
FN 39 : Preguiça ; FN 41 : Faja  
FN 50 : Recanto

Le tableau 8.10 donne l'image instantanée de la qualité des eaux en fin de saison sèche (9 juin 1982) des principaux captages de l'île.

La prise en compte d'analyses plus anciennes (BURGEAP) apparaîtra dans la représentation des diagrammes de SCHOELLER proposé dans les figures 8.17 à 8.19 et dans l'étude de certains rapports chimiques. On verra qu'il n'y a pas eu d'évolution significative dans le temps. Les analyses antérieures à nos propres analyses ne nous sont que partiellement

connues et l'absence de bilan ionique ne permet pas l'examen critique des résultats.

L'échantillon proposé dans les tableaux 8.8 et 8.9. a permis (DESCONNETS, 1987) d'identifier trois grandes familles d'eau mises en évidence dans le diagramme de PIPER proposé dans la figure 8.16.

On a :

- les eaux chlorurées sodiques et potassiques
- les eaux carbonatées sodiques
- les eaux chlorurées calciques et magnésieuses.

Si l'on excepte le cas particulier des piézomètres côtiers (FN 22, 55, 29, 47 et 33) de Tarrafal à Carriçal dont la minéralisation globale peut dépasser 20 g.l<sup>-1</sup>, l'aquifère étant envahi par la mer, les concentrations en matières dissoutes varient de 1,87 à 0,22 g.l<sup>-1</sup> avec des valeurs moyennes comprises entre 0,7 et 0,8 g.l<sup>-1</sup>.

La comparaison avec des eaux circulant dans des aquifères basaltiques (SCHOELLER, 1962) montre que les eaux de São Nicolau sont légèrement plus minéralisées que dans le schéma classique où l'on dépasse rarement 0,4 g.l<sup>-1</sup>.

En particulier, les teneurs en Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> sont plus importantes dans les eaux de São Nicolau.

Cela peut tenir à un temps de séjour prolongé compris entre 7,6 et 8,3 et donc nettement de ces eaux dans leurs aquifères. Le pH est basique.

Tableau 8.8 : Analyses chimiques des eaux souterraines à São Nicolau

| Réf. Forage | DATE     | pH  | EC 20° m.S | ANIONS meq.l <sup>-1</sup> (1) |                                  |                                     | CATIONS meq.l <sup>-1</sup> (1) |                         |                     |                      | SOMME   |        | BI % | SiO <sub>2</sub> mg.l <sup>-1</sup> | FeO <sub>3</sub> mg.l <sup>-1</sup> | Minéral g.l <sup>-1</sup> |
|-------------|----------|-----|------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|---------|--------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|             |          |     |            | Cl <sup>-</sup> (35.5)         | SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> 48 | O <sub>3</sub> H <sup>-</sup> (6.1) | Ca <sup>++</sup> (20)           | Mg <sup>++</sup> (12.1) | K <sup>+</sup> (39) | Na <sup>+</sup> (23) | cations | anions |      |                                     |                                     |                           |
| 41          | 15.10.81 | 8,2 | 0,46       | 1,42                           | 0,09                             | 1,50                                | 0,54                            | 0,80                    | 0,42                | 1,62                 | 3,01    | 3,38   | 6    | 21,2                                | 0,00                                | 0,22                      |
| 22          | 14.10.81 | 7,7 | 23,5       | 256                            | 25,7                             | 1,45                                | 13,4                            | 40,0                    | 5,16                | 225                  | 283,15  | 283,36 |      | 9,10                                | 0,00                                | 18,2                      |
| 22          | 17.11.81 | 7,6 | 22,0       | 238                            | 22,3                             | 1,80                                | 13,8                            | 34,5                    | 4,94                | 210                  | 262,1   | 263,24 | 0,2  | 8,3                                 | 0,00                                | 17,5                      |
| 22          | 17.12.81 | 7,7 | 22,5       | 244                            | 23,1                             | 2,20                                | 9,25                            | 40,0                    | 497                 | 217                  | 269,3   | 271,22 | 0,4  | 9,4                                 | 0,00                                | 17,5                      |
| 22          | 18.01.82 | 7,9 | 23,5       | 250                            | 23,1                             | 2,50                                | 9,37                            | 42,0                    | 5,12                | 217                  | 275,6   | 273,49 | -0,4 | 10,3                                | 0,00                                | 17,7                      |
| 22          | 19.02.82 | 7,5 | 0,92       | 256                            | 23,1                             | 2,55                                | 8,87                            | 44,5                    | 5,34                | 225                  | 281,65  | 283,71 | 0,4  | 10,4                                | 0,00                                | 18,1                      |
| 2           | 17.11.81 | 8,2 | 0,85       | 3,50                           | 0,34                             | 0,2<br>4,50                         | 0,96                            | 2,62                    | 0,26                | 5,44                 | 8,54    | 9,28   | 4,0  | 24,4                                | 0,00                                | 0,50                      |
| 2           | 17.12.81 | 8,3 | 0,85       | 2,50                           | 0,26                             | 0,3<br>4,50                         | 0,94                            | 2,56                    | 0,26                | 5,39                 | 8,56    | 9,15   | 3,3  | 25,6                                | 0,00                                | 0,50                      |
| 2           | 18.10.82 | 8,3 | 0,83       | 3,50                           | 0,34                             | 0,2<br>4,65                         | 0,93                            | 2,62                    | 0,26                | 5,39                 | 8,69    | 9,20   | 2,9  | 25,6                                | 0,00                                | 0,51                      |
| 2           | 19.02.82 | 8,2 | 0,84       | 3,50                           | 0,34                             | 0,3<br>4,55                         | 0,96                            | 2,56                    | 0,26                | 5,44                 | 8,69    | 9,22   | 3,0  | 25,1                                | 0,00                                | 0,50                      |
| 24          | 14.10.81 | 8,2 | 0,88       | 4,00                           | 0,26                             | 0,3<br>4,15                         | 0,96                            | 2,44                    | 0,22                | 5,75                 | 8,71    | 9,37   | 3,7  | 25,6                                | 0,00                                | 0,53                      |
| 24          | 17.12.81 | 8,1 | 0,86       | 3,72                           | 0,34                             | 0,2<br>4,30                         | 0,95                            | 2,44                    | 0,21                | 5,62                 | 8,59    | 9,22   | 3,5  | 25,4                                | 0,00                                | 0,51                      |
| 24          | 18.01.82 | 8,3 | 0,86       | 4,00                           | 0,26                             | 0,2<br>4,30                         | 0,95                            | 2,37                    | 0,21                | 5,62                 | 8,76    | 9,15   | 2,2  | 25,6                                | 0,00                                | 0,53                      |
| 24          | 19.02.82 | 8,2 | 0,87       | 3,75                           | 0,34                             | 0,2<br>4,35                         | 0,97                            | 2,37                    | 0,21                | 5,62                 | 8,64    | 9,17   | 3,0  | 37,2                                | 0,00                                | 0,53                      |
| 24          | 17.11.81 | 8,2 | 0,85       | 3,75                           | 0,17                             | 0,3<br>4,25                         | 0,93                            | 2,31                    | 0,21                | 5,50                 | 8,47    | 8,95   | 2,8  | 28,0                                | 0,00                                | 0,49                      |
| 33          | 17.12.81 | 8,1 | 2,90       | 22,0                           | 1,54                             | 8,80                                | 2,62                            | 6,87                    | 0,29                | 22,4                 | 32,34   | 32,18  | -0,2 | 37,2                                | 0,00                                | 1,87                      |
| 33          | 19.02.82 | 8,3 | 2,95       | 23,0                           | 1,46                             | 0,6<br>7,80                         | 2,44                            | 7,12                    | 0,28                | 22,4                 | 32,86   | 32,24  | -1,0 | 37,4                                | 0,00                                | 1,80                      |
| 50          | 18.11.81 | 7,7 | 0,70       | 11,5                           | 1,20                             | 4,35                                | 1,30                            | 3,81                    | 0,24                | 12,0                 | 17,05   | 17,35  | 0,9  | 28,8                                | 0,00                                | 1,00                      |
| 50          | 18.12.81 | 8,3 | 1,65       | 11,5                           | 1,11                             | 0,3<br>4,00                         | 1,25                            | 3,87                    | 0,22                | 11,8                 | 16,91   | 17,14  | 0,7  | 28,2                                | 0,00                                | 0,98                      |
| 50          | 02.03.82 | 8,1 | 1,70       | 10,4                           | 1,20                             | 4,30                                | 1,24                            | 3,94                    | 0,22                | 11,4                 | 15,90   | 16,80  | 1,3  | 29,8                                | 0,00                                | 0,99                      |
| 8           | 17.12.81 | 8,3 | 1,45       | 8,50                           | 0,86                             | 0,4<br>5,15                         | 1,62                            | 4,37                    | 0,31                | 8,80                 | 14,91   | 15,10  | 0,6  | 40,4                                | 0,00                                | 0,86                      |
| 8           | 18.01.82 | 8,4 | 1,45       | 7,90                           | 0,86                             | 0,4<br>5,15                         | 1,42                            | 4,37                    | 0,30                | 8,70                 | 14,31   | 14,79  | 1,6  | 39,6                                | 0,00                                | 0,83                      |
| 38          | 12.10.81 | 7,8 | 0,54       | 2,25                           | 0,17                             | 1,80                                | 0,87                            | 1,31                    | 0,35                | 2,25                 | 4,22    | 4,78   | 6,2  | 34,4                                | 0,00                                | 0,32                      |
| 38          | 18.11.81 | 7,4 | 0,53       | 2,25                           | 0,17                             | 1,85                                | 0,87                            | 1,37                    | 0,35                | 5,12                 | 4,27    | 4,71   | 4,9  | 34,0                                | 0,00                                | 0,32                      |
| 38          | 18.01.82 | 7,3 | 0,52       | 2,25                           | 0,17                             | 1,80                                | 0,90                            | 1,37                    | 0,35                | 2,12                 | 4,22    | 4,74   | 5,8  | 33,6                                | 0,00                                | 0,32                      |
| 38          | 19.02.82 | 7,4 | 0,48       | 2,25                           | 0,34                             | 1,80                                | 0,86                            | 1,37                    | 0,35                | 2,12                 | 4,39    | 4,70   | 3,4  | 34,0                                | 0,00                                | 0,33                      |
| 39          | 15.10.81 | 8,1 | 0,54       | 2,20                           | 0,26                             | 0,2<br>1,90                         | 0,80                            | 1,50                    | 0,41                | 2,37                 | 4,56    | 5,08   | 5,4  | 28,4                                | 0,00                                | 0,31                      |
| 1           | 23.9.83  | 8,3 | 0,55       | 2,50                           | -                                | -                                   | 0,63                            | 1,13                    | 0,69                | 4,44                 | 6,89    | -      | -    | 31,0                                | -                                   | épuisé                    |
| 5           | 16.8.83  | 7,8 | 0,95       | 4,50<br>159                    | 0,0<br>0,0                       | 5,00<br>305                         | 1,63<br>32,6                    | 2,75<br>33              | 0,56<br>21,8        | 4,13<br>95           | 9,07    | 9,50   | 4,7  | 31,0                                | 0,0                                 | 0,677                     |
| 57          | 16.8.83  | 7,1 | 14,0       | 135<br>4792                    | 12,90<br>619                     | 2,30<br>140                         | 23,25<br>465                    | 40,00<br>484            | 2,50<br>97,5        | 88,00<br>2024        | 153,75  | 150,20 | 2,3  | 20,0                                | 0,0                                 | 8,64                      |

(1) Les valeurs entre parenthèses indiquées dans les colonnes des ions majeurs sont les coefficients de passage aux concentrations en mg.l<sup>-1</sup>

Tableau 8.9 : Analyses chimiques des eaux souterraines à São Nicolau

| Réf. Forage | DATE    | pH   | EC 20° m.S | ANIONS meq.l <sup>-1</sup> (1) |                                  |                       | CATIONS meq.l <sup>-1</sup> (1) |                         |                     |                      | SOMME   |        | BI % | SiO <sub>2</sub> mg.l <sup>-1</sup> | FeO <sub>2</sub> mg.l <sup>-1</sup> | Minéral g.l <sup>-1</sup> |
|-------------|---------|------|------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|---------|--------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|             |         |      |            | Cl <sup>-</sup> (35.5)         | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 48 | O <sub>3</sub> H (61) | Ca <sup>++</sup> (20)           | Mg <sup>++</sup> (12.1) | K <sup>+</sup> (39) | Na <sup>+</sup> (23) | cations | anions |      |                                     |                                     |                           |
| 33          | 23.9.83 | 7.8  | 2.85       | 20.000<br>710                  | 0.0<br>0.0                       | 0.0<br>7.10<br>433    | 2.88<br>57.6                    | 6.80<br>82.2            | 0.69<br>26.9        | 17.5<br>402          | 27.87   | 27.10  | 2.8  | 38.0                                | 0.0                                 | 1.74                      |
| 47          | 26.9.83 | 7.8  | 3.50       | 32.00<br>1136                  | 3.26<br>156                      | 0.0<br>2.20<br>134    | 1.00<br>20                      | 1.63<br>19              | 0.94<br>36          | 34.00<br>782         | 37.57   | 37.46  | 0.3  | 14.0                                | 0.0                                 | 2.29                      |
| 42          | 26.9.83 | 8.1  | 1.65       | 11.20<br>397                   | 1.03<br>49                       | 0.40<br>3.92<br>239   | 1.44<br>28.8                    | 3.56<br>43              | 0.44<br>5.32        | 11.60<br>266         | 17.04   | 16.55  | 2.9  | 37.0                                | 0.0                                 | 1.06                      |
| 5           | 23.9.83 | 8.6  | 0.96       | 4.60<br>163                    | 0.51<br>24                       | 0.72<br>4.16<br>253   | 1.19<br>23.8                    | 2.75<br>33              | 0.38<br>14.8        | 5.94<br>136          | 10.26   | 9.99   | 2.7  | 31.0                                | 0.0                                 | 0.678                     |
| 51          | /       | 8.1  | 4.40       | 31.25<br>1109                  | 4.63<br>222                      | 0.80<br>7.20<br>439   | 2.25<br>45                      | 19.00<br>229            | 1.13<br>44          | 22.50<br>517         | 44.88   | 43.88  | 2.3  | 65.0                                | 0.0                                 | 2.67                      |
| 30          | /       | 8.3  | 3.90       | 27.50<br>976                   | 4.63<br>222                      | 0.80<br>5.52<br>336   | 2.69<br>53.8                    | 8.20<br>99              | 1.25<br>48.7        | 27.00<br>621         | 39.14   | 38.45  | 1.8  | 41.5                                | 0.0                                 | 2.39                      |
| 29          | /       | 8.3  | 7.10       | 59.50<br>2112                  | 8.91<br>427                      | 1.36<br>5.40<br>329   | 7.75<br>155                     | 21.75<br>263            | 2.00<br>78          | 45.00<br>1035        | 76.50   | 75.17  | 1.7  | 52.0                                | 0.0                                 | 4.45                      |
| 28          | /       | 8.3  | 6.20       | 50.00<br>1775                  | 7.03<br>337                      | 1.04<br>5.04<br>307   | 7.50<br>150                     | 18.75<br>226.8          | 1.50<br>58.5        | 36.00<br>823         | 63.75   | 63.11  | 1.0  | 50.0                                | 0.0                                 | 3.72                      |
| 31          | /       | 8.4  | 2.30       | 13.75<br>488                   | 2.06<br>98.8                     | 0.72<br>5.92<br>361   | 2.00<br>40                      | 4.60<br>55.6            | 0.69<br>26.9        | 16.00<br>368         | 23.29   | 22.45  | 3.7  | 40.0                                | 0.0                                 | 1.47                      |
| Carrical    | /       | 8.2  | 1.75       | 11.30<br>401                   | 1.37<br>65.7                     | 0.40<br>4.16<br>253   | 1.25<br>25                      | 3.00<br>36              | 0.44<br>17          | 13.20<br>303         | 17.89   | 17.23  | 3.8  | 35.0                                | 0.0                                 | 1.13                      |
| 43          | /       | 8.2  | 1.45       | 9.00<br>319                    | 1.20<br>57                       | 0.32<br>3.88<br>236   | 1.88<br>37                      | 4.18<br>50.5            | 0.50<br>19.5        | 8.30<br>190          | 14.86   | 14.40  | 3.2  | 38.0                                | 0.0                                 | 0.947                     |
| 2           | 23.9.83 | 8.4  | 0.85       | 3.75<br>133                    | 0.69<br>33                       | 0.40<br>4.16<br>253   | 0.94<br>18.8                    | 2.31<br>27.9            | 0.50<br>19.5        | 5.38<br>123          | 9.13    | 9.00   | 1.4  | 30.0                                | 0.0                                 | 0.638                     |
| 22          | 16.8.83 | 7.45 | 22.0       | 250<br>8875                    | 24.40<br>1171                    | 3.00<br>183           | 11.00<br>220                    | 50.00<br>605            | 5.60<br>218         | 216.0<br>4968        | 282.60  | 277.40 | 1.9  | 10.5                                | 0.0                                 | 16.2                      |
| 33          | /       | 7.75 | 2.75       | 20.0                           | -                                | 7.00                  | 3.00                            | 7.50                    | 0.63                | 18.00                | 29.13   | -      | -    | 37.0                                | 0.0                                 | épuisé                    |
| 24          | /       | 7.8  | 0.87       | 4.25                           | -                                | 4.40                  | 1.06                            | 2.31                    | 0.50                | 5.60                 | 9.47    | -      | -    | 28.0                                | 0.0                                 | épuisé                    |
| 1           | /       | 7.85 | 0.58       | 2.0<br>71                      | 0.86<br>41                       | 3.40<br>207           | 0.63<br>12.6                    | 1.13<br>13.6            | 0.56<br>21.8        | 4.30<br>98.9         | 6.62    | 6.26   | 5.7  | 30.5                                | 0.0                                 | 0.496                     |
| 8           | 22.9.83 | 8.0  | 1.55       | 8.50                           | -                                | -                     | 2.06                            | 4.44                    | 0.81                | 9.50                 | 16.81   | -      | -    | 42.5                                | -                                   | épuisé                    |
| 57          | 23.9.83 | 7.1  | 14.0       | 140<br>4970                    | 12.40<br>595                     | 2.00<br>122           | 26.75<br>535                    | 43.75<br>529            | 2.31<br>90          | 87.00<br>2001        | 159.81  | 156.40 | 2.2  | 21.5                                | 0.0                                 | 8.86                      |
| 22          | /       | 7.3  | 23.5       | 240<br>8520                    | 23.10<br>1108                    | 3.00<br>183           | 12.50<br>250                    | 44.00<br>532            | 5.25<br>204.7       | 204.0<br>4692        | 266.75  | 266.10 | 0.2  | 8.5                                 | 0.0                                 | 15.4                      |
| 2           | 16.8.83 | 7.7  | 0.87       | 3.75<br>133                    | 1.71<br>82                       | 5.00<br>305           | 0.94<br>18.8                    | 2.31<br>27.9            | 0.50<br>19.5        | 5.40<br>124          | 9.15    | 8.75   | 4.5  | 29.0                                | 0.0                                 | 0.739                     |
| 24          | 23.9.83 | 8.0  | 0.89       | 4.0                            | -                                | -                     | 1.00                            | 2.31                    | 0.50                | 5.60                 | 9.41    | -      | -    | 29.0                                | -                                   |                           |
| 9           | 23.9.83 | 7.65 | 1.40       | 7.25<br>257                    | 0.86<br>41                       | 6.00<br>366           | 1.44<br>28.8                    | 4.06<br>49              | 0.63<br>24.6        | 8.70<br>200          | 14.83   | 14.11  | 5.1  | 42.0                                | 0.0                                 | 1.00                      |
| 55          | 16.8.83 | 11.3 | 27.5       | 260<br>9230                    | 8.57<br>4.11                     | 15.80<br>963          | 12.20<br>244                    | 0.08<br>0.96            | 13.50<br>526.5      | 258.0<br>5934        | 283.78  | 284.37 | 0.2  | 2.5                                 | 0.0                                 | 17.3                      |

(1) Les valeurs entre parenthèses indiquées dans les colonnes des ions majeurs sont les coefficients de passage aux concentrations en mg.l<sup>-1</sup>

Tableau 8.10 : Analyses d'eau - Prélèvement du 9 juin 1982

| Réf. Forage | Localisé          | pH  | EC 20° m.S | ANIONS meq.l <sup>-1</sup> (1) |                                  |                                    | CATIONS meq.l <sup>-1</sup> (1) |                         |                     |                      | SOMME   |        | BI % | SiO <sub>2</sub> mg.l <sup>-1</sup> | FeO <sub>3</sub> mg.l <sup>-1</sup> | Minéral g.l <sup>-1</sup> |
|-------------|-------------------|-----|------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|---------|--------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
|             |                   |     |            | Cl <sup>-</sup> (35.5)         | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 48 | O <sub>3</sub> H <sup>-</sup> (61) | Ca <sup>++</sup> (20)           | Mg <sup>++</sup> (12.1) | K <sup>+</sup> (39) | Na <sup>+</sup> (23) | cations | anions |      |                                     |                                     |                           |
| 1           | Tarrafal (périm.) | 7.5 | 0.57       | 2.0                            | 0.26                             | 3.40                               | 0.57                            | 1.17                    | 0.18                | 4.0                  | 5.92    | 5.66   | 4.6  | 28                                  | 0                                   | 0.37                      |
| 17          | Petchena          | 7.9 | 1.15       | 4.0                            | 0.60                             | 7.90                               | 3.87                            | 3.62                    | 0.24                | 4.5                  | 12.23   | 12.50  | 2.2  | 40                                  | 0                                   | 0.75                      |
| -           | galerie Faja      | 8.0 | 0.83       | 2.5                            | 0.34                             | 5.70                               | 2.69                            | 2.62                    | 0.24                | 3.06                 | 8.61    | 8.54   | 0.8  | 42                                  | 0                                   | 0.55                      |
| 11-15       | Ribeirinha        | 7.9 | 2.3        | 12.0                           | 2.14                             | 10.0                               | 6.75                            | 8.37                    | 0.64                | 10.0                 | 25.76   | 24.14  | 6.7  | 35.5                                | 0                                   | 1.65                      |
| 13-14       | Maiama            | 7.9 | 3.5        | 22.0                           | 0.17                             | 4.30                               | 8.00                            | 14.6                    | 0.84                | 12.9                 | 36.3    | 26.5   | 37   | 35.0                                | 0                                   | 2.95                      |
| 121         | A. de Torno       | 7.6 | 0.69       | 2.0                            | 0.17                             | 4.2                                | 2.12                            | 2.31                    | 0.24                | 2.75                 | 7.42    | 6.37   | 16   | 35.5                                | 0                                   | 0.47                      |
| 38a         | R. d'Agua         | 7.8 | 1.2        | 6.50                           | 0.51                             | 4.90                               | 2.37                            | 4.19                    | 0.26                | 5.80                 | 12.62   | 11.91  | 6.0  | 52.0                                | 0                                   | 0.80                      |
| 18          | Corveiros         | 7.7 | 1.05       | 6.50                           | 0.60                             | 3.4                                | 1.06                            | 2.50                    | 0.18                | 6.75                 | 10.49   | 10.50  | 0.1  | 31.0                                | 0                                   | 0.65                      |
| 15a         | Maria Palinha     | 7.6 | 0.78       | 2.50                           | 0.26                             | 5.80                               | 2.50                            | 3.0                     | 0.26                | 3.00                 | 8.76    | 7.76   | 13   | 42                                  | 0                                   | 0.54                      |

(1) Les valeurs entre parenthèses indiquées dans les colonnes des ions majeurs sont les coefficients de passage aux concentrations en mg.l<sup>-1</sup>

La teneur en silice est comprise entre 20 à 30 mg.l<sup>-1</sup>, ceci en parfait accord avec les observations générales. Les analyses n'ont pas décelé de fer.

On a mis en évidence une relation relativement étroite ( $r = 0,992$ ) sur les analyses de 1978 à 1980 entre Cl<sup>-</sup> et Mg<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> rMg<sup>2+</sup> = 0,566 rCl<sup>-</sup> + 42,2

Une analyse plus détaillée peut être faite au niveau des diagrammes de SCHOELLER. En se limitant aux deux aquifères précédemment étudiés, différents phénomènes peuvent être mis en évidence :

- les échanges de base entre Na et Ca, Mg sont observés sur les eaux de l'aquifère de Preguiça (FN 8 et 38a).

- Correspondance évidente entre les eaux amont et aval de la vallée de Faja, montrant

un enrichissement des matières dissoutes vers l'aval.

On peut également faire quelques rapides remarques :

- La source d'Agua do Torno a une représentation de SCHOELLER différente, mettant en évidence une minéralisation plus importante en Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> que sur les autres sites étudiés et supérieure (en meq.l<sup>-1</sup>) au Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>. L'aquifère n'est pas seulement constitué de basaltes mais aussi d'une succession de couches de lapillis et cendres et autres produits plus carbonatés.

- Cette caractéristique ne se retrouve pas sur le versant sud du Monte Gordo dans les forages de Tarrafal ; par contre les nappes d'alimentation profonde de tarrafal montrent un rapport Na/Cl nettement plus fort que pour les eaux recueillies sur le versant nord.

Fig. 8-17: ANALYSES D'EAU (DIAGRAMME DE SCHOELLER)

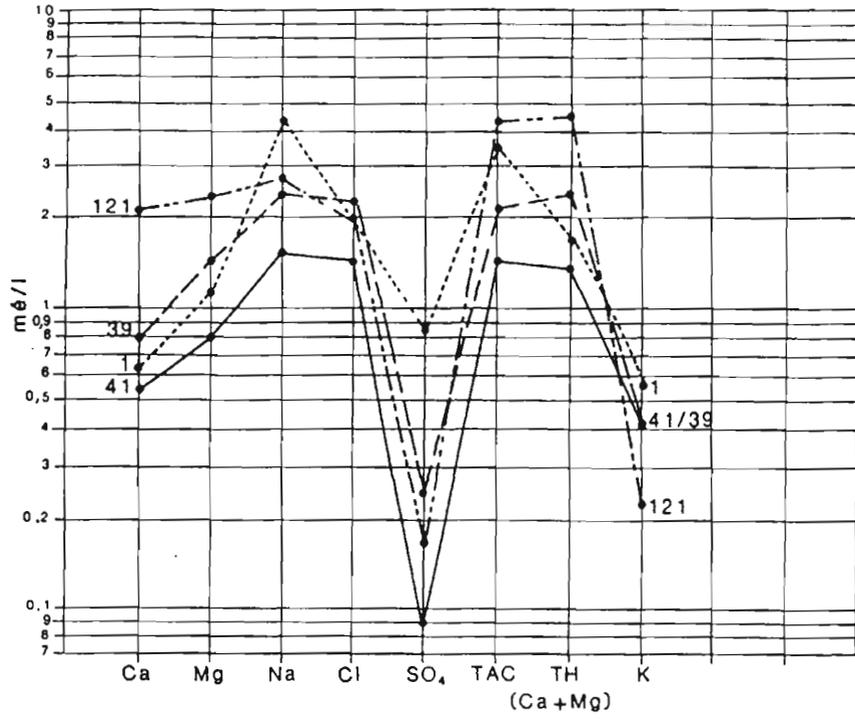
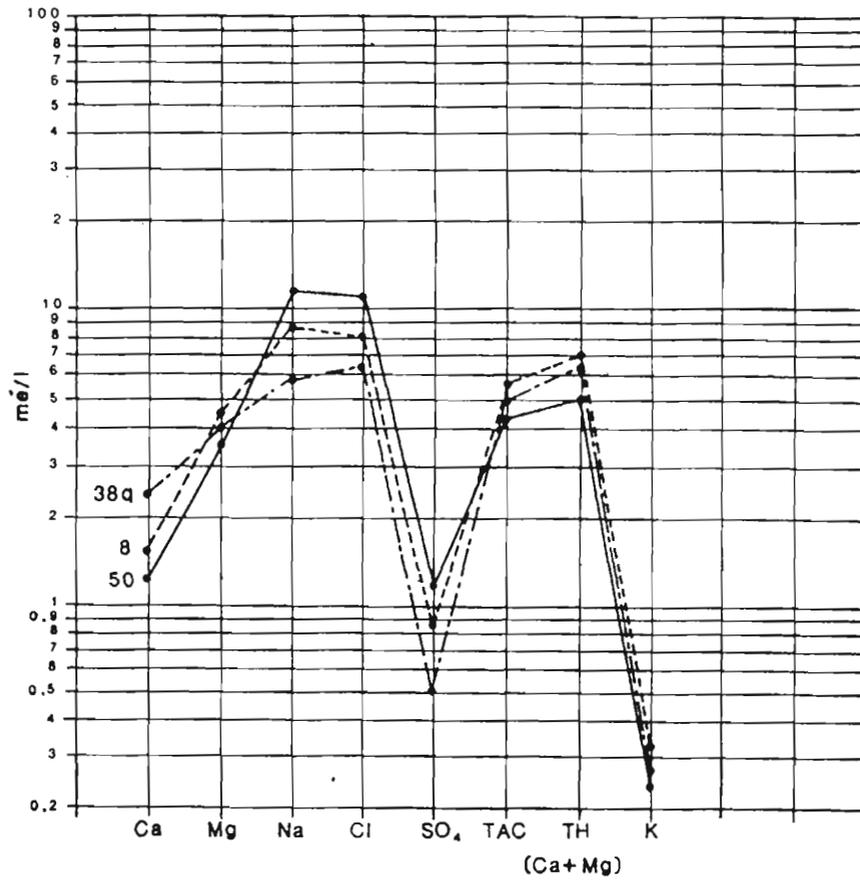


Fig. 8-18: ANALYSES D'EAU (DIAGRAMME DE SCHOELLER)



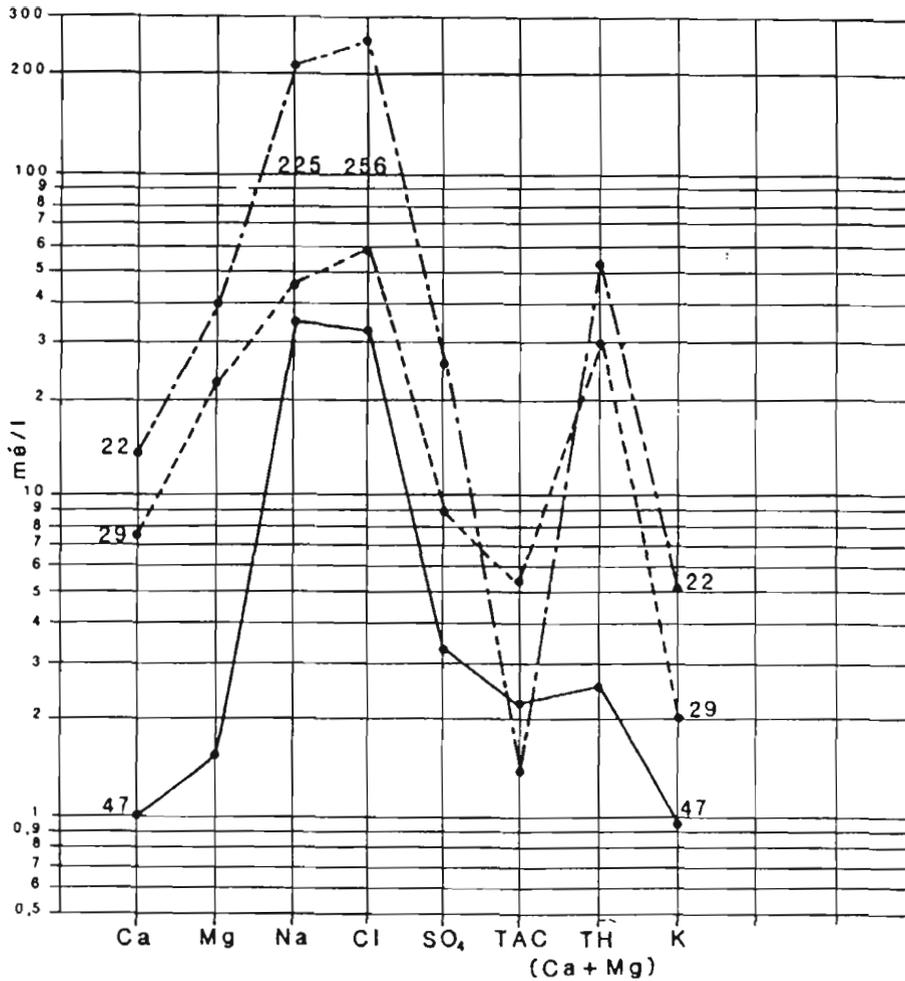


Fig. 8-19: Analyses d'eau (diagramme de Schoeller)  
(ici pollution marine)

On considère souvent que la température de l'eau souterraine est un indicateur de celle de l'air dans la zone d'infiltration de l'eau de pluie et donc de l'altitude -au niveau des températures moyennes annuelles- des zones d'alimentation des aquifères. Dans les îles montagneuses, les différences de température entre eaux infiltrées en altitude et tempéra-

ture de l'océan pourraient mettre en évidence des résurgences marines si leurs débits sont importants. Ce n'est pas le cas de São Nicolau, on l'a vu pour les débits. Les températures mesurées sur des eaux de forage en exploitation montrent en outre très souvent une origine thermique due au volcanisme de l'île.

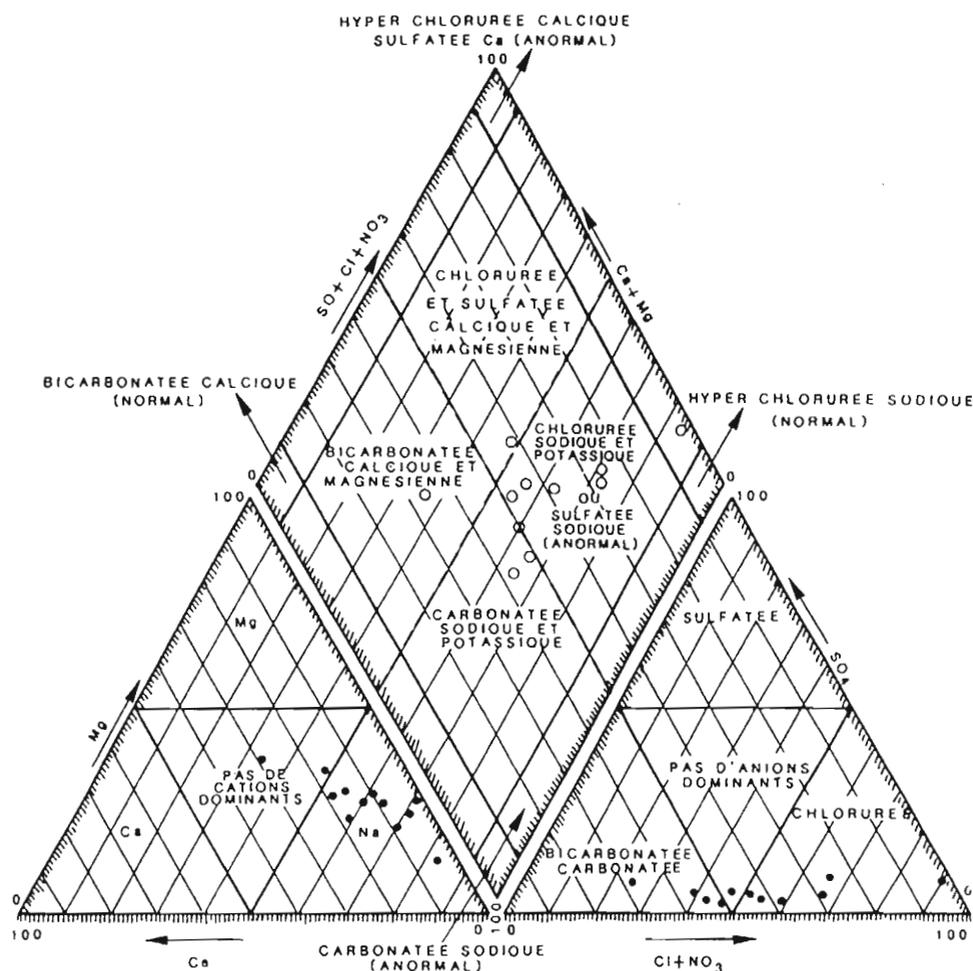


Fig.8-16 Analyses chimiques (diagramme de Piper)

Ainsi à Tarrafal, le BURGEAP mesurait en octobre 1978 :

au FN1 une température de 28 à 27°C après plus de 28 heures de pompage  
 au FN5 une température de 25°C

En février 1982, nous avons mesuré à Campo da Preguiça : au Forage 10 (Aérowatt, en exploitation) une température de 27,2°C  
 au Forage 8 (piézomètre, à 12 m sous la surface de l'eau) une température de 26,5°C.

A Tarrafal, sur le FN1 nous avons eu confirmation de la température élevée des eaux (27,4°C). Ceci se retrouve sur beaucoup d'autres forages. Par contre, les températures d'Estancia Braz de 23,8°C dans le forage d'exploitation et 24,4°C dans le piézomètre (FN 38 et 39) ou de Faja au forage FN41 de 22,5°C concordent avec les températures moyennes de l'air pour les altitudes respectives des sites.

Les températures chaudes indiquent un certain thermalisme et des eaux relativement confinées, tandis que les températures froides suggèrent ici une infiltration et un écoulement rapide de la nappe (coulées récentes, alluvions).

Cette situation correspondrait donc respectivement aux aquifères de Campo di Preguiça et de Faja pour ne citer qu'eux.

Du point de vue de la potabilité de l'eau, les eaux citées rentrent le plus souvent dans les normes internationales. Une exception doit être faite d'emblée pour le forage 22 (et autres forages côtiers) pour lequel nous avons déjà signalé la pollution marine. D'autres réserves doivent être faites pour les forages 8, 33 et 50 dont la concentration des eaux en Cl<sup>-</sup> dépasse largement les 200 mg.l<sup>-1</sup> des normes de la C.E.E. tout en restant dans des limites admissibles des recommandations internationales. De même pour les forages, les teneurs en Mg<sup>2+</sup> sont un peu plus élevées que les maximums recommandés. Ces fortes teneurs indiquent probablement un héritage marin dans l'aquifère de Campo di Preguiça, dont nous avons d'ailleurs parlé dans l'étude géologique (SERRAILHERO et al op.cit.).

Les fortes teneurs en chlore indiquent aussi l'incidence des influences marines sur la composition de l'eau de pluie.

Des analyses représentées dans le tableau 8.11 montrent des concentrations très variables d'un lieu à l'autre et d'une averse à l'autre. La proximité immédiate de la mer est ressentie à Estancia Braz avec le maximum de 75,6 mg.l<sup>-1</sup>. L'altitude et une plus grande distance de l'océan ne marquent pas de conditions significatives des variations de teneurs en Cl<sup>-</sup> (station de Faja et Cachaço).

Tableau 8.11 : ANALYSE DU CHLORURE DES PLUIES

| N° | Lieu      | Date     | Chlorures |       |
|----|-----------|----------|-----------|-------|
|    |           |          | meq/l     | mg/l  |
| 1  | Est. Bras | 20.07.81 | 0.60      | 21.3  |
| 2  | Est. Bras | 25.07.81 | 2.13      | 75.6  |
| 3  | St Taimo  | 08.09.81 | 0.45      | 15.9  |
| 4  | Cachaço   | 12.09.81 | 0.48      | 17.04 |
| 5  | Faja      | 14.09.81 | 0.20      | 7.1   |
| 6  | S. Joao   | 14.09.81 | 0.18      | 6.39  |
| 7  | Faja      | 15.10.81 | 1.25      | 44.3  |

Une analyse exhaustive de la composition chimique des eaux, de son suivi dans le temps et de ses relations avec les aquifères sortait du cadre de notre projet d'étude. Nous avons donc volontairement limité notre analyse aux points particuliers susceptibles de fournir une information complémentaire sur la ressource en eau ou le comportement des aquifères.

## 3.2. ANALYSES ISOTOPIQUES

Deux types de prélèvements ont été faits à São Nicolau. Le premier avait pour objectif la mesure de la composition isotopique des eaux souterraines et des eaux de pluie en  $^{18}\text{O}$  et éventuellement  $^2\text{H}$  (Deutérium) ; le deuxième avait un objectif de datation des eaux souterraines par dosage des isotopes du carbone. Les analyses ont été faites par le Laboratoire de Géodynamique et d'hydrologie Isotopique d'ORSAY (professeur J.C. FONTES).

### 3.2.1. Analyses sur $^{18}\text{O}$

La composition isotopique de l'eau permet d'identifier les concentrations respectives des principaux isotopes constitutifs de la molécule d'eau. Cette composition peut être modifiée par un changement partiel de phase (condensation à partir d'une masse de vapeur, évaporation à partir d'un liquide). Par rapport aux isotopes légers, les isotopes lourds montrent une aptitude plus grande au changement partiel de phase vapeur-liquide et plus faible au changement partiel de phase inverse - aptitudes d'autant plus marquées que la température est basse. Ainsi dans le cycle de l'eau, la masse de vapeur née de l'eau océanique montre un appauvrissement en isotopes lourds ; au cours de différents stades de condensation successifs, la masse de vapeur continue de s'appauvrir ; les précipitations connaissant un enrichissement relatif en isotopes lourds. Au sol, par évaporation les eaux s'enrichissent encore par rapport aux pluies. Si ces eaux sont soustraites à l'évapotranspiration par une infiltration rapide,

elles conservent la marque des pluies d'origine.

Les teneurs de  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ont été déterminées par équilibration à  $25^\circ\text{C}$  de l'échantillon d'eau avec  $\text{CO}_2$  et analyse du gaz au spectromètre de masse à double collection.

Le rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de l'échantillon est comparé au rapport d'un standard classique appelé SMOW (Standard Mean Oceanic Water) correspondant à la moyenne d'une série de mesures de l'eau océanique. Les résultats sont exprimés en termes de  $\delta$  ou parts pour mille de différence relative :

$$\delta = \frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ échantillon}}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ SMOW}} \cdot 1000$$

Une eau à  $\delta$  négatif est appauvrie en isotopes lourds.

Les résultats sont donnés dans les tableaux 8.12 et 8.13.

On remarquera que la plupart des analyses situent la composition isotopique des eaux souterraines à des valeurs  $\delta$  comprises entre -4 et -4,8.

Certaines valeurs se rapprochent du standard SMOW ; dans le cas du FN22, les valeurs de -2 à -2,75 traduisent l'invasion marine de l'aquifère de même que sur le poste FN19 (-2,85 à -3,42) ; dans le cas de la source de Maria Lalinha (-3,55) et du captage de Carvoeiros (-2,72 à -3,19), il est possible que ces aquifères superficiels (alluvions) soient

enrichis par évaporation en isotopes lourds.

Si l'on s'en tient à l'échantillon de 15 valeurs, la moyenne de  $\delta$  est de -4,47 et l'écart-type  $s$  de 0,19 ; en incluant les valeurs de la nappe à Estancia Braz, la moyenne passe à -4,31 avec  $s = 0,30$ . En considérant tout l'échantillon

d'eaux souterraines (à l'exclusion des FN 22 et 19), soit 29 valeurs, la moyenne est encore de -4,02 et  $s = 0,55$ , soit un coefficient de variation nettement plus important que sur l'échantillon de 15 valeurs.

Tableau 8.12 : ANALYSES ISOTOPIQUES

| Nature du lieu | lieu de prélèvement | $\delta^{18}O \text{ ‰ Smow}$ |       |       |       |       |       |   | OBSERVATIONS                                       |
|----------------|---------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|----------------------------------------------------|
|                |                     | 1                             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7 |                                                    |
| FN1            | Tarrafal            | -4,61                         |       |       |       |       |       |   | Prélèvement le 2.7.83                              |
| FN2            | Tarrafal            | -4,29                         | -4,66 | -4,30 | -3,78 | -4,56 |       |   | 1,2,3 : 4,5 : 31/9/82                              |
| FN5            | Tarrafal            | -4,56                         |       |       |       |       |       |   | 16/3/82 = niveaux 21 7.83                          |
| FN9            | Preguiça (campo)    | -4,60                         |       |       |       |       |       |   | 2.7.83                                             |
| FN10           | Preguiça (campo)    | -4,80                         |       |       |       |       |       |   | 2.7.83                                             |
| FN19           | Bocade Ribeira      |                               | -3,42 | -2,85 |       | -     |       |   | 31/3/82                                            |
| FN22           | Tarrafal            | -2,29                         | -2,34 | -2,33 | -2,0  | -2,39 | -2,75 |   | 1,2,3 : 16.3.82<br>4,5,6 : 31.3.82 = niveaux       |
| FN24           | Tarrafal            | -4,38                         | -4,52 | -4,49 | -4,31 | 4,55  | -4,37 |   | idem FN 22                                         |
| FN33           | Carvoeiros          | -2,72                         | -3,18 | -3,19 |       |       |       |   | le 16.3.82 = niveaux du forage                     |
| FN38           | Estancia Bras       | -4,06                         | -3,95 | -3,80 | -3,97 | -3,88 |       |   | 1,2,3,4 : 16/3/82 = niveaux<br>5 : 19/2/83         |
| FN39           | Estancia Bras       | -3,85                         |       |       |       |       |       |   | eau du piézomètre 16/3/82                          |
| FN41           | Faja de Cima        | -9,34                         | -4,03 |       |       |       |       |   | 12.9.81 (eau "évaporée")<br>2 : eau de pompage     |
| FN50           | Aval Rio Seca       | -3,49                         | -3,62 | -3,10 | -3,45 |       |       |   | 16.3.82 = niveaux                                  |
| Pluviométrie   | João N°1 (1981)     | -3,01                         | -4,20 | -2,95 |       |       |       |   | 1 : 8/9 = 1,7 ; 2 : 13/9 = 106,5<br>3 : 14/9 = 3,0 |
| Poste Météo    | Faja (12) (pluie)   | -4,30                         | -4,20 | -3,45 |       |       |       |   | 15 9,2 6 9 et 15.10 81                             |
| Pluviométrie   | Talho (5) (pluie)   | -2,71                         | -3,23 |       |       |       |       |   | 8.9. et 14.9.81                                    |

Poste pluviométrique : 1 : Vila S. Joao ; 5 : Talho ; 9 : Cachaço ; 10 : Monte Gordo ; 12 : Faja do Cima ; 15 Estancia Braz

Tableau 8.13 : ANALYSES ISOTOPIQUES

| Nature du lieu        | lieu de prélèvement    | $\delta^{18}O \text{ ‰ Smow}$ |         |       |       |      |      |   | OBSERVATIONS          |
|-----------------------|------------------------|-------------------------------|---------|-------|-------|------|------|---|-----------------------|
|                       |                        | 1                             | 2       | 3     | 4     | 5    | 6    | 7 |                       |
| Pluviométrie          | Cachaço (9) (pluie)    | -1,89                         | -4,81   | -1,63 |       |      |      |   | 12/9 - 13/9 - 25/9/81 |
| Capteur de brouillard | Caminho 1              | -0,25                         | + 0,06* |       |       |      |      |   | 7/7/82 et 24/7/82     |
| Capteur de brouillard | Monte Gordo Casa 2     | -1,05                         |         |       |       | -    |      |   | 24/7/82               |
| Pluviométrie          | N° 15, 1, 5, 12, 9, 10 | -3,95                         | -4,00   | -4,08 | -4,52 | 4,64 | 4,71 |   | Pluie cumulée en 1982 |
| Captage               | Maria Palinha (source) | -3,55                         |         |       |       |      |      |   | 13.10.81              |

Poste pluviométrique : 1 : Vila S. Joao ; 5 : Talho ; 9 : Cachaço ; 10 : Monte Gordo ; 12 : Faja do Cima ; 15 Estancia Braz

En dehors des nappes d'Estancia Braz, des FN 50 de Carvoeiros et de Maria Palinha, déjà citées, les variations de composition isotopique ne paraissent pas traduire d'information significative sur l'altitude des aires d'alimentation des aquifères. Les variations pour un même forage se situent dans la même gamme que celles observées d'un forage à l'autre.

Les mesures de la composition isotopique des précipitations restent très ponctuelles pour qu'une étude de fond puisse être tentée. On remarque cependant des valeurs d'une grande variabilité d'une averse à l'autre : de -2,95 à -4,20 pour Vila Joao (n°1), de -1,63 à -4,81 pour Cachaço (n°9), ...

Dans l'échantillon disponible, les averses les plus importantes (celle du 13.9.81 sont les moins riches en isotopes lourds (de l'ordre de -4 à -5).

Du fait de l'importance de ces grosses précipitations dans le total annuel, il n'est pas surprenant que l'on retrouve ces valeurs dans l'analyse des volumes cumulés des précipitations recueillies à divers postes. Mesurée en six postes, la composition isotopique annuelle des pluies correspond pour 1982 à celle des nappes qui ont été étudiées : cela supposerait donc une relative constance de cette composition isotopique dans le temps et une infiltration rapide des précipitations soustrayant celles-ci aux processus d'évapotranspiration.

On note un gradient altimétrique assez net entre les valeurs observées. Il paraît relativement faible entre 400 et 1000 m d'altitude et plus fort entre la côte et 200 m. L'ensemble reste cependant assez dispersé et demanderait à être précisé. Ce gradient, encore que nettement plus faible qu'au Mont Cameroun (FONTES, OLIVRY, 1976), suffirait à expliquer les différences de composition relevées par plusieurs nappes d'alimentation côtière (faible altitude) (figure 8.20).

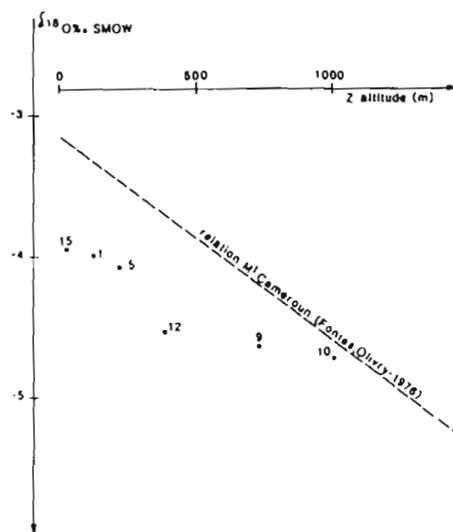


Fig. 8.20 PRECIPITATIONS 1982-SAO NICOLAU-COMPOSITION ISOTOPIQUE  $\delta^{18}O$  ET ALTITUDE

Un dernier mot concerne les analyses faites sur les précipitations occultes relevées au Monte Gordo par capteur de brouillard : les compositions sont étonnamment proches du SMOW. Les gouttelettes de brouillard sont condensées à faible altitude et profitent d'ascendances atmosphériques pour se déposer en montagne.

### 3.2.2. Teneur en radiocarbone d'eaux souterraines

L'objectif de ce type de mesure est de déterminer le temps de résidence des eaux dans leur aquifère. Ici, une priorité est apparue à l'endroit de la nappe exploitée par le forage (FN10) de Campo da Preguiça dont on pouvait craindre dès les premiers mois de la mise en service un épuisement dans des délais assez courts s'il n'y avait pas réalimentation. La méthode de "datation" est basée sur une mesure des teneurs en  $^{14}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$  du carbone inorganique total dissous (CITD). Les prélèvements ont été faits à la mi-février 1982. J.C. FONTES (1987) a résumé la méthodologie employée :

#### - sur le terrain

Environ 200 l d'eau ont été prélevés dans des récipients en plastique au niveau de l'alimentation du réservoir par le forage. La conductivité, la température et le pH ont été mesurés in situ ainsi que l'alcalinité par titration à l'acide  $\text{H}_2\text{SO}_4$  N/50 en présence d'hélianthine.

Le carbone total dissous a été précipité après ajustement du pH à une valeur comprise entre 9 et 10 par addition de quelques pastilles de soude. la précipitation est ensuite provoquée par addition de chlorure de bargum en excès. Le précipité recueilli par décantation en évitant les contacts avec l'air est transféré dans un flacon de plastique de 1l pour le transport jusqu'au laboratoire.

#### - Au laboratoire

Le précipité est acidifié sous vide pour en extraire quantitativement le  $\text{CO}_2$  qui est ensuite transformé en benzène, forme chimique propice au comptage, selon la technique classique (FONTES, 1970).

Le comptage de la teneur en radiocarbone du benzène est réalisé dans un spectromètre à scintillation liquide (intertechnique SL30) en présence d'un agent scintillant (Butul PBD). La précision de la mesure dépend du nombre d'impulsions recensées. le résultat est exprimé en pourcentage de carbone moderne.

La mesure de la teneur en  $^{13}\text{C}$  est faite sur une partie aliquote du précipité de  $\text{BaCO}_3$  rincé, séché et acidifié sous vide pour obtenir du  $\text{CO}_2$  pur. Ce gaz est ensuite mesuré au spectromètre de masse à double collection (VG 602D). La précision de la mesure est  $\pm 0,1\%$ . sur les résultats exprimés en pour mille par rapport à l'étalon international de référence PBD.

J.C. FONTES (op.cit.) aboutit aux résultats suivants :

Désignation : Cap Vert S.N.

Conductivité : 520 $\mu\text{s}$

Activité % : 49,5  $\pm$  0,5

... $^{13}\text{C}$  PBD : - 10,59

Il relève que le problème majeur, en ce qui concerne l'interprétation des teneurs en radiocarbone du CITD, réside dans les possibilités de dilution de la teneur initiale. La teneur initiale désigne l'activité en  $^{14}\text{C}$  du

CITD dans la zoned'infiltration ou zone de recharge de la nappe. Dans cette zone, le CITD est essentiellement dérivé du CO<sub>2</sub> issu de la respiration des végétaux et de la fermentation de la matière organique d'origine végétale. Dans les deux cas, l'activité est voisine de 100% de carbone moderne, sauf dans le cas d'un carbone assimilé photosynthétiquement après le début des essais nucléaires à la suite desquels l'activité du CO<sub>2</sub> porteur de l'activité moderne peut se trouver dilué par la mise en solution de carbonate solide ancien. En ce cas toutefois, les teneurs en carbone 13 peut permettre de corriger cette dilution dans la mesure où le carbonate solide d'origine sédimentaire est en général enrichi en <sup>13</sup>C par rapport au carbone biogénique issu de la photosynthèse. On peut exclure une dilution par du carbonate sédimentaire dans le cas de Campo da Preguiça sur la base des données géologiques (la nappe est localisée dans des dépôts volcanodétritiques) ainsi que d'après la teneur en <sup>13</sup>C du CITD qui ne montre pas une telle dilution. Au contraire, la teneur en <sup>13</sup>C du CITD est parfaitement compatible avec une minéralisation en système dit "ouvert" sur le CO<sub>2</sub> des sols (cf. FONTES, 1985).

D'autre part, un autre risque de dilution de l'activité initiale du CITD est celui qui est dû à la présence possible de CO<sub>2</sub> d'origine profonde (volcanique ou crustale) dans le système. Cela pourrait être le cas aux îles du Cap vert où l'activité volcanique est récente. Toutefois, le CO<sub>2</sub> d'origine profonde est lui

aussi enrichi en <sup>13</sup>C par rapport au CO<sub>2</sub> biogénique puisqu'il montre une teneur généralement proche de celle du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (Deines, 1980).

En d'autres termes, il est possible de rendre compte de la teneur en <sup>13</sup>C du CITD comme si elle était exclusivement issue de l'activité des sols.

Cette conclusion indique que la teneur en <sup>14</sup>C du CITD peut alors être comparée à celle de l'atmosphère pour évaluer un âge radiométrique selon la formule de décroissance radioactive.

$$t = T_{1/2} / \ln 2 \ln A_0/A_t$$

où

t est le temps écoulé en années

A<sub>t</sub> est l'activité <sup>14</sup>C mesurée au temps t

T<sub>1/2</sub> est la période de décroissance radioactive du carbone

$$(T_{1/2} = 5730 \pm 30 \text{ ans})$$

A<sub>0</sub> est l'activité initiale du CITD au moment du début de la décroissance lorsque le CITD s'est trouvé isolé de l'atmosphère des sols, c'est à dire du passage entre la zone non saturée et la zone saturée au niveau de la surface phréatique ; pour la période antérieure aux essais nucléaires A<sub>0</sub> = 5660 a.

Le calcul donne donc une eau d'âge 5645 ± 78 ans.

En conclusion, FONTES indique : l'eau prélevée à Campo da Preguiça est vieille de 5 à 6000 ans, c'est à dire date de l'époque du dernier Humide Néolithique dans les régions sahéliennes. Cette période était caractérisée par des précipitations nettement plus abondantes qu'à l'époque actuelle ainsi qu'en témoignent les reconstitutions fondées sur les restes polliniques (Lézine, 1987). Il est donc fort douteux que la réserve d'eau souterraine soit actuellement renouvelée dans les mêmes proportions.

Sous réserve d'un inventaire plus complet qui pourrait être conduit sur les points d'eau obtenus par forage (à l'écart des écoulements actuellement rechargés par les pluies les plus fortes), on peut faire l'hypothèse que l'eau de certaines nappes du Cap Vert représente une réserve fossile, non reconstituée dont l'exploitation aurait un caractère "minier".

Ceci doit être le cas d'un certain nombre d'aquifères de l'île de São Nicolau et méri-

terait d'être approfondi. Pour identifier des recharges récentes, une méthodologie basée sur le Tritium peut être envisagée ; des dosages de plus en plus fins permettent une précision acceptable bien que la marque des expériences atomiques en atmosphère se voit largement estompée depuis 1963.

De fait, les recherches isotopiques évoluent très rapidement et la qualité des diagnostics s'améliore chaque jour montrant les promesses de ces méthodologies nouvelles dans des recherches du type de celles effectuées à São Nicolau.

Pratiquement, les résultats de cette étude isotopique, s'ils ne sont guère optimistes, ont au moins eu le mérite d'alerter les hydrogéologues sur le caractère limité de certaines réserves, ce qui s'est malheureusement confirmé dans les rabattements de la nappe de Campo da Preguiça dont nous avons déjà parlé.



Prélèvements et mesure de l'alcalinité de l'eau du forage du périmètre maraîcher de TARRAFAL, le 16 mars 1982.  
(Photo J.C. Olivry).



## CONCLUSIONS GENERALES



## CONCLUSIONS GENERALES

Réunir dans cette synthèse les résultats de travaux effectués par l'ORSTOM en matière d'hydrologie constituait un des derniers objectifs des interventions du projet ORSTOM dans l'île de São Nicolau. Il va de soi que ces résultats ont été discutés au fur et à mesure de leur élaboration avec les artisans des projets d'aménagement et de développement ; cela a permis aux responsables du M.D.R., de la Coopération Française, de la SCET Internationale et du BURGEAP d'ajuster les actions entreprises, au réel niveau des ressources en eau de l'île, en revoyant malheureusement celles-ci à la baisse.

On pourrait légitimement s'étonner que le projet ait associé dans le même temps le volet "études" et le volet "aménagements". Mais les études du milieu naturel restent dépendantes dans nos travaux des aléas climatiques, ... On a vu l'indigence de l'information recueillie malgré la prolongation des études sur deux années supplémentaires. Aurait-il fallu attendre six années d'études préliminaires avant d'engager les travaux de forage, de captage des eaux tant attendus par les populations de São Nicolau ? Bien évidemment non ! Même si les prévisions des projeteurs n'ont pas toujours été vérifiées, le projet a abouti à un "mieux vivre" global à São Nicolau qui se confirme chaque année davantage grâce à la mobilisation des services techniques nationaux et de la coopération extérieure.

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de l'étude hydrologique de São Nicolau :

1) A São Nicolau, d'abord, et sans revenir sur les résultats donnés, les études ont permis :

- de définir, au niveau du bilan hydrologique, un modèle de recharge des nappes qu'il serait facile d'améliorer par un suivi des précipitations journalières au niveau des intensités et une connaissance des caractéristiques hydriques des sols (RFU) ;
- de caractériser les paramètres géomorphologiques permettant d'identifier les bassins représentant les plus gros risques de crues catastrophiques et d'érosion grave, en chiffrant les maximums de crue et la dégradation spécifique.
- de relier l'hydrologie de surface au contexte hydrogéologique et en particulier d'introduire les analyses isotopiques en complément du diagnostic relatif aux nappes souterraines (recharge et renouvellement).

2°) Dans le futur, pour des études comparables, sur d'autres îles, la conduite des travaux de recherche devrait prendre en compte :

- la nécessaire collaboration entre hydrogéologues et hydrologues ; il est absolument indispensable que les nappes des bassins soient relativement connues (Forages et piézomètres, débits des sources, etc).

- dans une phase préliminaire, l'étude isotopique des nappes (Tritium pour recharge récente, radiocarbone pour eaux non renouvelées). Ceci permettrait d'identifier les bassins pour lesquels l'hydrologie de surface est susceptible de chiffrer la recharge et donc les limites d'exploitation des ressources souterraines.
- la nécessité de procéder à l'équipement de stations de mesures automatiques, sur le plan des précipitations, des débits liquides et solides, avec autant que possible télétransmission des données. Il n'est pas possible de mobiliser en permanence les personnels nécessaires à ces mesures ; ceux-ci ne peuvent intervenir que ponctuellement et il convient donc de procéder à l'installation d'équipements permanents : ouvrages de génie civil (déversoirs, seuils), limnigraphes, préleveurs, pluviographes, stations météorologiques, la télétransmission pouvant se faire dans le système Argos ou le système Météosat.

A l'avenir, les études de ce type devraient donc prévoir une phase préliminaire, fonction des finalités du projet (aménagement), et des infrastructures plus coûteuses que celles qui ont été implantées à São Nicolau, mais dont la pérennité et une gestion facile par les services

nationaux permettront un suivi à moindre coût, pendant de nombreuses années, des variables hydroclimatiques.

De telles études n'ont jamais paru aussi nécessaires qu'aujourd'hui. Les investigations confirment partout le caractère limité des réserves souterraines ; à la situation climatique souvent critique de l'archipel se sont ajoutées les perturbations climatiques globales de ces dernières années avec leur cortège d'événements exceptionnels (abats d'eau "cycloniques"). Dans ce contexte peu encourageant, que les météorologues et climatologues expliquent mal encore, les acteurs du développement de la République du Cap-Vert ne se sont pas limités à gérer la pénurie : leurs efforts tendent à optimiser de manière durable la gestion des ressources en eau existantes.

Je souhaite que dans le cadre des travaux qui nous avaient été confiés à São Nicolau cette étude constitue une contribution de base au développement du pays. Avec Antonio Nunes (1944), "je rêve du jour où ces campagnes dénudées par l'exode des gens, les années de sécheresse, [ ] filles de notre effort, fruits de notre sueur "verront" l'eau coulant par courants énormes, les plantes dressées chaudes de sèves nouvelles, jaillissant de la terre [ ] donnant vigueur à la Vie ! ...".

## BIBLIOGRAPHIE

**ACADEMIE DES SCIENCES D'OUTRE-MER, 1975.** - La sécheresse en zone sahélienne. Causes. Conséquences. Etude des mesures à prendre. In n° 4216-4217 Notes et études documentaires. La documentation Française, Paris, septembre 1975.

**ALVES L.M., 1981.** - Agrométéorologie aux îles du Cap-Vert. Mémoire d'ITA (Agrhymet - CILSS - OMM) Niamey.

**BABAU M.C., ALVES L.M., SILVA R.L., 1981.** - Les conditions générales au Cap-Vert : Approche des contraintes climatiques et évaluation des ressources en eau. 16 p. + fig. et tableaux. MDR - DMM - Praia Cabo Verde.

**BAILLY, COLOMBANI, GAUD, HOORELBECKE, PARE, 1981.** - Compte rendu de la mission recherche en République du Cap-Vert (8-22 janvier 1981). Ministère de la Coopération. Paris.

**BRUNET-MORET Y., 1969.** - Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie. Vol. VI n° 3 - Paris.

**BURGEAP, 1974.** - La mise en valeur des eaux souterraines dans l'archipel du Cap-Vert. Rapport en fin de mission. R 140 et E 140 (Y. VAILLEUX et L. BOURGUET) - Paris.

**1980.** - Campagne de forages, galeries et captages dans l'île de SAO NICOLAU, 1979-1980. R 400 et E 843 - Paris.

**1982.** - Note technique n° 42. Campo do Preguiça. Premiers résultats de l'exploitation du forage FN 10.

**1982.** - La mise en valeur des eaux souterraines dans l'île de SAO NICOLAU.

**1983.** - Etude générale du Massif du PICO da Antonia. Rapport R 548 - Praia.

**CABRAL N.E., 1980.** - Le moulin et le pilon, les îles du Cap-Vert. Ed. de l'Harmattan ACGT - Paris.

**CALLEDE J., 1980.** - Recueil des données pluviométriques des îles du Cap-Vert de l'origine des stations à 1977. ORSTOM - Paris.

**CARN M., 1984.** - Analyses diffractométriques de sédiments de SAO NICOLAU (inédit).

**CHATELAIN M., 1982.** - Catalogue des principaux arbres du Cap-Vert (inédit).

**CHEVALIER A., 1935.** - Les îles du Cap-Vert. Flore de l'Archipel. Museum National d'Histoire Naturelle. Paris.

**COLOMBANI J., OLIVRY J.C., KALIEL, R., 1984.** - Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide en Afrique aride et semi-aride. Proceedings of the Harare Symposium. IAHS Publ. n° 4. pp. 295-300.

**CUNHA F. Reis., 1961.** - O Balanço Hidrológico na Ilha de Santiago (Cabo Verde). Sep. Garcia de Orta 9(2) : 359-379.

**1962.** - Estabelecimentos Meteorológicos de Cabo Verde. Estud. agron. (Lisboa) 3(1) : 21-35.

**1963.** - Observation de la précipitation provenant du brouillard dans l'archipel du Cap-Vert. Commun. à Conf. das Nações Unidas sobre a Aplicação da Ciência e Tecnologia a favor das Regiões pouco Desenvolvidas (Genebra).

**1964.** - O problema da captação da água do nevoeiro em Cabo Verde. Garcia de Orta. Vol./2 nº 4. pp. 719-756 - Lisboa.

**DEINES P., 1980.** - The isotopic composition of reduced organic carbon. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Elsevier Pub. Co - Amsterdam, 329-406.

**DE MARCK M., 1980.** - Projet de développement de la vallée de Faja - CNEARC-MDRP (à paraître).

**DESCONNETS J.Ch., 1987.** - Contribution à l'étude des ressources souterraines dans l'île de SAO NICOLAU. Mémoire de licence Gestion de l'eau - Avignon-Montpellier.

**DUBREUIL P., GUISCAFRE J., 1971.** - La planification du réseau hydrométrique minimal. Cahiers Hydrologie ORSTOM. Vol. VIII nº 2 - Paris.

**FONSECA H.D., 1962.** - Contribuição para o Estudo do problema bioclimático do Milho em Cabo Verde. Bol. de Propaganda et Informação de Cabo Verde - Praia.

**FONTES J. Ch., 1971.** - Un ensemble destiné à la mesure de l'activité du radiocarbone naturel. Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn. (2) Vol. XIII fox. 1 - 67-86.

**1985.** - Some considerations on groundwater dating using environmental isotopes. International Associations of Hydrogeologists. Mémoires of the 18 th Congress - Cambridge, 119-154.

**1987.** - Rapport sur la teneur en radiocarbone de l'eau souterraine du site de Campo di Preguiça (SAO NICOLAU, archipel du Cap-Vert, 4 p. - Orsay.

**FONTES J.Ch., OLIVRY J.C., 1976.** - Premiers résultats sur la composition isotopique des précipitations de la région du Mont Cameroun. Cahiers Hydrologie ORSTOM, Vol. XIII nº 3 - Paris.

**GALLAIRE R., 1979.** - Etude de deux petits bassins versants de l'île de SAO NICOLAU. Campagne 1978. ORSTOM - Dakar.

**GOUJON, LE GOUPIL, ROCHE M., 1976.** - Rapport de mission hydrologie - forêts - bassins versants. (CTFT, IRAT, ORSTOM) - Ministère de la Coopération - Paris.

**GRONDIN J.L., 1979.** - Analyse minéralogique de sédiments recueillis sur la R. Brava à SAO NICOLAU (Cap-Vert) (communication de résultats).

**HOORELBECKE R., 1981.** - Rapport de mission à SAO NICOLAU. Campagne 1981. ORSTOM - Dakar.

**KALFANE N., 1980.** - Rapport d'Activité. Projet de mise en valeur de SAO NICOLAU. MOR. Coopération Française.

**LERIQUE J., 1978.** - Rapport de mission à SAO NICOLAU (juin-juillet 1978).

**LEROUX M., 1980.** - Le Climat de l'Afrique Tropicale - Dakar. Thèse d'Etat. Dijon. 3 tomes, 1427 pages.

**LEZINE A.M., 1987.** - Paléoenvironnements végétaux d'Afrique nord - tropicale depuis 12000 ans B.P. Thèse Doctorat-es-Sciences. Université Marseille Luminy.

**MASSON H., 1948.** - Condensations atmosphériques non enregistrables au pluviomètre (Bull. IFAN n° 10).

**MDR Cap-Vert, 1977.** - La production agricole nationale - Perspectives pour 1977, 1978. Praia.

**NUNES M., 1962.** - Os solos da ilha de SAO NICOLAU junta de investigações de Ultramar estudos, euserios et documentos n° 94 - Lisboa.

**OLIVRY J.C., 1981.** - Etude des précipitations à SAO NICOLAU (République des îles du Cap-Vert. ORSTOM - Dakar. Traduit en portugais : Estudo de precipitacoes em SAO NICOLAU.

1983. - Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). Cahiers ORSTOM, série Hydrologie. Vol. XX n° 1 - Praia.

1986. - Fleuves et rivières du Cameroun. MESRES-ORSTOM - Paris.

1987. - Crues et inondations. Méthode simplifiée de prédétermination des crues sur petits bassins versants en milieu intertropical : l'exemple du Cameroun. Actes du Colloque de Strasbourg. ULP-CEREG. pp. 77-91.

**PARE J., 1979.** - Rapport de mission d'appui. Précipitations à SAO NICOLAU. GERDAT - Paris.

**PELISSIER R., 1982.** - Africana - Bibliographies sur l'Afrique luso-hispanophone 1800-1980. Ed. Pelissier - Orgeval.

**ROCHE M., 1963.** - Hydrologie de surface. Gauthier-Villars.

**ROCHE M., 1973.** - Dossier sécheresse. Analyse du phénomène climatique. In Techniques et Développement, novembre-décembre 1973.

**RODIER J.A., ROCHE M., 1978.** - La sécheresse actuelle en Afrique tropicale. In Bulletin des Sciences Hydrologiques, vol. XVIII n° 4, 1978, pp. 411-418.

**RODIER J.A., AUVRAY, 1965.** - Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> en Afrique occidentale. Paris, ORSTOM-CIEH.

**SCET International, 1978.** - L'île de SAO NICOLAU. Diagnostic et schéma d'aménagement MDR - Ministère de la Coopération - Paris.

**SERRALHEIRO A., LOURDES UBALDO M., 1979.** - Estudo estratigrafico dos sedimentos do Campo da Preguiça ilha de SAO NICOLAU (Cabo Verde). Garcia de Orta. Ser. Geol. - Lisboa 3(1-2), pp. 75-82.

**SERVAT E., 1982.** - Essai d'analyse des précipitations occultes sur le massif du Monte Gordo (SAO NICOLAU - Cabo Verde). ORSTOM - Dakar, 16 p.

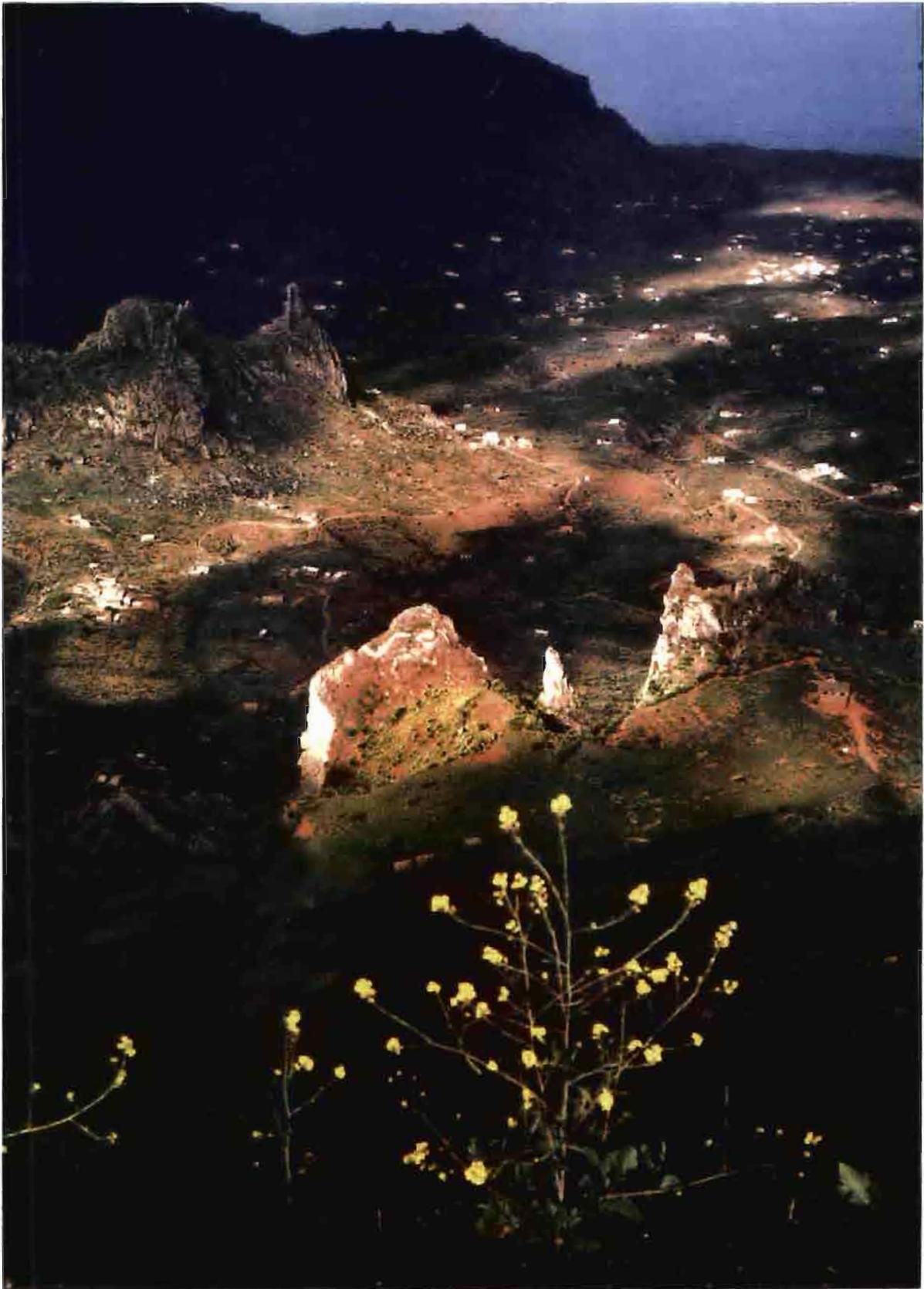
**SIRCOULON J., 1976.** - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. XIII n° 2. Paris.



Tarrafal sur la côte Sud-ouest et le Monte Gordo, 1312 m, coiffé par les nuages.



Vila, capitale de São Nicolau et la vallée de la Ribeira Brava



Vue de la vallée de Faja, bassin de la Ribeira Grande.



Bougainvillées dans la vallée de la Ribeira Brava.

## LISTE DES FIGURES

|      |       |                                                                                                                                                    |           |
|------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Fig. | 1-1   | République des îles du Cap-Vert : situation .                                                                                                      | page : 14 |
|      | 1-2   | L'Archipel des îles du Cap-Vert.                                                                                                                   | 19        |
|      | 1-3   | Variation saisonnière moyenne de la zonalité climatique intertropicale en Afrique de l'ouest et aux îles du Cap-Vert.                              | 35        |
|      | 1-4   | Situation de l'Archipel et esquisse des mécanismes déterminants du climat en février et en août.                                                   | 37        |
|      | 1-5   | Ombrothermogrammes de quelques villes de l'Archipel des îles du Cap-Vert.                                                                          | 41        |
|      | 1-6   | Pluviométrie annuelle et moyennes mobiles annuelles à Praia -Sao Tiago (Cabo Verde).                                                               | 43        |
|      | 1-7   | Pluviométrie et moyennes mobiles annuelles à Vila de Ribeira Brava, Sao Nicolau (Cabo Verde).                                                      | 43        |
|      | 1-8   | <i>Dracaena draco</i> (Dragoeiro).                                                                                                                 | 54        |
|      | 1-9   | <i>Prosopis Juliflora</i> (Acacia Americana)<br><i>Faidherbia albida</i> (Espinheiro Branco).                                                      | 55        |
|      | 1-10  | <i>Parkinsonia Aculeata</i> (Acacia Espinheiro)<br><i>Acacia Nilotica</i> (Acacia Espinheira ou Espinheiro preto).                                 | 56        |
|      | 1-11  | <i>Acacia Farnesiana</i> (Espinheiro preto, esponjeira)<br><i>Ziziphus Mauriciana</i> (Zimbrao).                                                   | 57        |
|      | 1-12  | <i>Tamarindus Indica</i> (Tamarinheiro)<br><i>Phyllanthus Acidus</i> (Azedinha, Groselheira, Uba, Macacauba).                                      | 58        |
|      | 2-1   | Sao Nicolau - Carte ancienne de l'île.                                                                                                             | 69        |
|      | 2-2   | Ile de Sao Nicolau : réseau hydrographique.                                                                                                        | 70        |
|      | 2-3   | Ile de Sao Nicolau : carte géologique.                                                                                                             | 79        |
|      | 3-1   | contrôle de l'homogénéité des séries par la méthode de comparaison des totaux cumulés annuels.                                                     | 108       |
|      | 3-2   | Exemples de corrélations entre précipitations annuelles de différents postes et de Vila.                                                           | 111       |
|      | 3-2-a | Ile de Sao Nicolau : isohyètes établies sur la période 1941-1980                                                                                   | 116       |
|      | 3-4   | Sao Nicolau - Vila da Ribeira Brava : ajustement de différentes distributions statistiques à l'échantillon de hauteur de précipitations annuelles. | 120       |
|      | 3-5   | Analyse fréquentielle des précipitations annuelles à Sao Nicolau (Praia Branca - Cachaço)                                                          | 121       |

|            |                                                                                                                                       |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3-6        | Analyse fréquentielle des précipitations annuelles suivant une distribution de Gumbel (Calejao Campo - Calejao Posto)                 | 122 |
| 3-7        | Ajustement graphique d'une loi de Gauss (Preguica - Morroalto).                                                                       | 123 |
| 3-8        | Esquisse cartographique de quelques résultats de l'analyse fréquentielle des précipitations annuelles à Sao Nicolau.                  | 126 |
| 3-9        | Hauteurs annuelles de précipitations sur 39 années et évolution des moyennes mobiles calculées sur 5 ans (Vila da Ribeira Brava).     | 127 |
| 3-10       | histogrammes des précipitations moyennes mensuelles à Sao Nicolau.                                                                    | 132 |
| 3-11       | Variations de quelques valeurs caractéristiques des précipitations mensuelles à Sao Nicolau.                                          | 133 |
| 3-12       | Hauteurs de précipitations journalières pour différentes périodes de retour.                                                          | 147 |
| 3-13       | Hyétogrammes caractéristiques relevés à Faja da Cima.                                                                                 | 151 |
| 4-1        | Bassins versants de la Ribeira Grande et de la Ribeira Brava : Schéma des installations hydrométéorologiques.                         | 160 |
| 4-2        | Hypsométrie des bassins de Vila de Ribeira Brava et de Faja.                                                                          | 162 |
| 4-3        | Bassins versants de la Ribeira Grande et de la Ribeira Brava : la hiérarchie du réseau hydrographique.                                | 164 |
| 4-4        | Rapports de confluence (Rc) et rapports de longueur du réseau hydrographique des bassins de la Ribeira Grande et de la Ribeira Brava. | 167 |
| 4-5        | Profil en long de la Ribeira Brava et de ses principaux affluents.                                                                    | 168 |
| 4-6        | Profil en long de la Ribeira Grande et de ses principaux affluents.                                                                   | 169 |
| 4-7        | Géologie des bassins.                                                                                                                 | 171 |
| 4-8        | Equipements hydrométriques NEYRPIC utilisés à Estancia Braz (Ribeira Grande).                                                         | 183 |
| 4-9        | Equipements hydrométriques NEYRPIC utilisés à Vila (R. Brava).                                                                        | 184 |
| 5-1 et 5-2 | variations de température observées à Faja de Cima et à Estancia Braz de 1978 à 1984.                                                 | 201 |
| 5-3        | Températures moyennes de 1978 à 1984.                                                                                                 | 202 |
| 5-4        | Gradient altimétrique de la température moyenne annuelle.                                                                             | 204 |

|       |                                                                                                          |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5-5   | Variations de l'humidité moyenne et évaporation mensuelle PICHE de 1978 à 1984 à Faja de Cima.           | 207 |
| 5-6   | Variations de l'humidité moyenne et évaporation mensuelle PICHE de 1978 à 1984 à Estancia Braz.          | 207 |
| 5-7   | Humidité relative moyenne et évaporation PICHE moyenne de 1978 à 1984 à Estancia Braz et à Faja de Cima. | 208 |
| 5-8-a | Carte isohyètes : saison des pluies 1979                                                                 | 217 |
| 5-8-b | Carte isohyètes : saison des pluies 1980                                                                 | 218 |
| 5-8-c | Carte isohyètes : saison des pluies 1981                                                                 | 218 |
| 5-8-d | Carte isohyètes : saison des pluies 1982                                                                 | 219 |
| 5-8-e | Carte isohyètes : saison des pluies 1984                                                                 | 219 |
| 5-9   | Histogramme des précipitations mensuelles à Calejao, V. Sao Joao et Cachaço.                             | 220 |
| 5-10  | Histogramme des précipitations mensuelles à Estancia Braz, Faja de Cima et à Monte Gordo.                | 221 |
| 5-11  | Variation des hauteurs de précipitation avec l'altitude.                                                 | 222 |
| 5-12  | Répartition en % des fortes averses journalières.                                                        | 225 |
| 5-13  | Comparaison de deux périodes d'observation des averses journalières.                                     | 226 |
| 6-1   | Courbe de tarage de la station de Vila de Ribeira Brava.                                                 | 236 |
| 6-2   | Profil en travers de la Ribeira Brava.                                                                   | 237 |
| 6-3   | Exemple de tarage évolutif des basses eaux (crue du 9 septembre 1960) Ribeira Brava à Vila.              | 238 |
| 6-4   | Ribeira Brava : courbe de tarage.                                                                        | 238 |
| 6-5   | Profil en travers de la Ribeira Grande.                                                                  | 240 |
| 6-6   | Ribeira Grande - Estancia Braz : courbe de tarage.                                                       | 240 |
| 6-7   | Vila Ribeira Brava : hydrogramme de la crue du 26-09-1978.                                               | 243 |
| 6-8   | Isohyètes de la pluie du 26 septembre 1978.                                                              | 243 |
| 6-9   | Hyétogramme de l'averse du 26 septembre 1978.                                                            | 244 |
| 6-10  | Ribeira Grande : hydrogramme de la crue du 26 septembre 1978.                                            | 245 |
| 6-11  | Isohyètes de la pluie des 20 et 21 juillet 1979.                                                         | 245 |
| 6-12  | Faja de Cima : hyétogramme des pluies du 20 au 21 juillet 1979.                                          | 245 |

|        |                                                                |     |
|--------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 6-13   | Ribeira Brava : hydrogramme de la crue du 21 juillet 1979.     | 246 |
| 6-14   | Isohyètes de la pluie du 9 septembre 1980.                     | 247 |
| 6-15   | Talho : hyétogramme de l'averse du 9 septembre 1980.           | 247 |
| 6-16   | Ribeira Brava : hydrogramme de la crue du 9 septembre 1980.    | 247 |
| 6-17   | Faja : hyétogramme de l'averse du 9 septembre 1980.            | 247 |
| 6-18   | Ribeira Grande : hydrogramme de la crue du 9 septembre 1980.   | 248 |
| 6-19   | Isohyètes de la pluie du 2 septembre 1981.                     | 248 |
| 6-20   | Talho : hyétogramme de l'averse du 2 septembre 1981.           | 249 |
| 6-21   | Ribeira Brava : hydrogramme de la crue du 2 septembre 1981.    | 249 |
| 6-22   | Ribeira Grande : hydrogramme de la crue du 2 septembre 1981.   | 249 |
| 6-23   | Isohyètes de la pluie du 13 septembre 1981.                    | 250 |
| 6-24   | Talho : hyétogramme de l'averse du 13 septembre 1981.          | 250 |
| 6-25   | Ribeira Brava : hydrogramme de la crue du 13 septembre 1981.   | 250 |
| 6-26   | Ribeira Grande : hydrogramme de la crue du 13 septembre 1981.  | 251 |
| 6-27   | Isohyètes de la pluie du 29 août 1982.                         | 252 |
| 6-28   | Talho : hyétogramme de l'averse du 29 août 1982.               | 252 |
| 6-29   | Isohyètes de la pluie du 1er octobre 1983.                     | 253 |
| 6-30   | Ribeira Grande : Hydrogramme de la crue du 1er octobre 1983.   | 253 |
| 6-31   | Caractéristiques des crues observées sur les bassins.          | 254 |
| 6-32   | Isohyètes des averses n'ayant pas ruisselé.                    | 255 |
| 6-32-a | Isohyètes des averses n'ayant pas ruisselé.                    | 256 |
| 6-33   | Bassin de la Ribeira Brava : écoulements et hauteurs de pluie. | 264 |
| 6-34   | Ribeira Brava : maximum de crue et hauteur de précipitation.   | 267 |
| 6-35   | Ribeira Brava : écoulement et intensité des averses.           | 267 |
| 6-36   | Ribeira Grande : écoulement et pluie.                          | 269 |
| 6-37   | Ribeira Grande : maximum de crue et hauteur de pluie.          | 269 |

|      |                                                                                                         |     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6-38 | Détermination du paramètre relief R nn en fonction de $I_p$ et de $I_G$                                 | 273 |
| 6-39 | Abaque de calcul du maximum de crue spécifique.                                                         | 274 |
| 6-40 | Abaque de calcul du coefficient de ruissellement.                                                       | 275 |
| 6-41 | Abaque de calcul du temps de base des crues.                                                            | 275 |
| 7-1  | Estimation des transports solides en suspension de la Ribeira Brava à Vila (crue du 26-09-1978).        | 284 |
| 7-2  | Trasports solides en suspension de la Ribeira Brava à Vila (crues des 02-09-1981 et 13-09-1981).        | 285 |
| 7-3  | Transports solides en suspension sur la Ribeira Grande à Estancia Braz (crue du 13-09-1981).            | 285 |
| 7-4  | Répartition granulométrique des éléments fin du prélèvement de Ribeira Juan.                            | 287 |
| 7-5  | Diffractionnogramme des MES de la Ribeira Brava.                                                        | 291 |
| 7-6  | Diffractionnogramme des MES de la Ribeira Brava                                                         | 291 |
| 7-7  | Diffractionnogramme des MES de la Ribeira Grande.                                                       | 292 |
| 7-8  | Diffractionnogramme des MES de la Ribeira Grande.                                                       | 292 |
| 7-9  | Zones de précipitations occultes.                                                                       | 301 |
| 7-10 | Volumes mensuels recueillis sur les capteurs de brouillard 1 et 2.                                      | 307 |
| 8-1  | Comparaison entre événements observés et calculés pour He sur Ribeira Brava.                            | 319 |
| 8-2  | Comparaison entre événements observés et calculés pour He sur Ribeira Grande.                           | 319 |
| 8-3  | Ribeira Brava : évolution des termes du bilan.                                                          | 322 |
| 8-4  | Ribeira Grande : évolution des termes du bilan.                                                         | 322 |
| 8-5  | BV Ribeira Brava - bilan hydrologique (1945-1983).                                                      | 326 |
| 8-6  | BV Ribeira Grande - bilan hydrologique (1945-1983).                                                     | 326 |
| 8-7  | Evolution de la lame d'eau infiltrée et du débit global des sources et captages.                        | 328 |
| 8-8  | Situation des forages et captages d'eau réalisés par la Mission française de Coopération au 31-07-1980. | 329 |
| 8-9  | Débits moyens journaliers (56-80) des principales sources de Sao Nicolau.                               | 330 |

|        |                                                                                      |     |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8-10   | Courbes des débits mensuels (79-82) des sources s'alimentant dans les basaltes.      | 331 |
| 8-11   | Débits mensuels (79-82) des sources s'alimentant dans les alluvions et les lapillis. | 331 |
| 8-12   | Evolution des débits extraits et des niveaux statistiques.                           | 333 |
| 8-13-a | Coupe N-S passant par le Monte Gordo.                                                | 334 |
| 8-13-b | cadre hydrogéologique de la vallée de Faja.                                          | 335 |
| 8-14   | Agua Dos Anjos : débits journaliers (56-82) et (79-82).                              | 336 |
| 8-15   | Agua dos Anjos : courbe de tarissement.                                              | 337 |
| 8-16   | Analyses chimiques (diagramme de PIPER).                                             | 345 |
| 8-17   | Analyses d'eau (diagramme de SCHOELLER).                                             | 343 |
| 8-18   | Analyses d'eau (diagramme de SCHOELLER)                                              | 343 |
| 8-19   | analyses d'eau (diagramme de SCHOELLER) pollution marine.                            | 344 |
| 8-20   | Précipitations 1982 - Sao Nicolau - composition isotopique et altitude.              | 349 |

## LISTE DES TABLEAUX

|      |                                                                                                                              |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1-1  | Superficie, population et densité des Iles du Cap-Vert                                                                       | 17  |
| 1-2  | Classement des pluies journalières et indication des hauteurs de précipitation moyenne annuelle.                             | 39  |
| 1-3  | Précipitations aux Iles du Cap-Vert : Praia (Sao Tiago) et Vila Da Ribeira Brava (Sao Nicolau)                               | 40  |
| 3-1  | Liste des postes pluviométriques de l'île de Sao Nicolau (numérotation et coordonnées)                                       | 102 |
| 3-2  | Relevés anciens de Vila et Cachaço                                                                                           | 103 |
| 3-3  | Hauteurs des précipitations annuelles observées dans l'île de Sao Nicolau                                                    | 105 |
| 3-4  | Hauteurs des précipitations annuelles observées dans l'île de Sao Nicolau                                                    | 106 |
| 3-5  | hauteurs des précipitations annuelles observées dans l'île de Sao Nicolau                                                    | 113 |
| 3-6  | Estimation de la hauteur interannuelle de précipitations d'après les relations établies avec la station de Vila              | 115 |
| 3-7  | Test de différentes lois de distribution avec indication de leur pourcentage de probabilité                                  | 119 |
| 3-8  | Résultats de l'étude fréquentielle des précipitations annuelles sur 7 stations de l'île de Sao Nicolau                       | 124 |
| 3-9  | Estimation des précipitations moyennes mensuelles sur 5 stations de Sao Nicolau                                              | 130 |
| 3-10 | Estimation des précipitations moyennes mensuelles : valeurs extrêmes, quartiles et médianes                                  | 131 |
| 3-11 | Nombre moyen de jours de pluie à Sao Nicolau (entre parenthèses, le nombre d'années de l'échantillon)                        | 135 |
| 3-12 | Pluviométrie générale de l'île de Sao Nicolau (1979)                                                                         | 137 |
| 3-13 | Pluviométrie générale de l'île de Sao Nicolau (1980)                                                                         | 138 |
| 3-14 | Pluviométrie générale de l'île de Sao Nicolau (1981)                                                                         | 139 |
| 3-15 | Pluviométrie générale de l'île de Sao Nicolau 1982)                                                                          | 140 |
| 3-16 | Pluviométrie générale de l'île de Sao Nicolau (1983)                                                                         | 141 |
| 3-17 | Plus fortes précipitations journalières observées aux différentes stations de Sao Nicolau (de l'origine des stations à 1977) | 143 |
| 3-18 | Analyse statistique des hauteurs de précipitations journalières à Sao Nicolau                                                | 145 |

|      |                                                                                                                 |     |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4-1  | Répartition hypsométrique des bassins de Ribeira Grande et de Ribeira Brava                                     | 159 |
| 4-2  | Récapitulation des caractéristiques géométriques des bassins                                                    | 163 |
| 4-3  | Identification des affluents des deux bassins                                                                   | 165 |
| 4-4  | Caractéristiques du réseau hydrographique                                                                       | 165 |
| 4-5  | Pente des différents tributaires du réseau hydrographique des Ribeira Brava et Grande                           | 166 |
| 5-1  | Mesure du vent à la station de Faja                                                                             | 198 |
| 5-2  | Températures moyennes mensuelles et annuelles à Faja de Cima (390 m)                                            | 199 |
| 5-3  | Températures moyennes mensuelles observées sous abris à Estancia Braz (45 m)                                    | 200 |
| 5-4  | Humidité relative à la station de Faja de Cima (390 m) (%)                                                      | 205 |
| 5-5  | Humidité relative à Estancia Braz (45 m) (%)                                                                    | 206 |
| 5-6  | Evaporation mensuelle et annuelle mesurée sur PICHE en mm à la station de Faja de Cima (390 m)                  | 209 |
| 5-7  | Evaporation mensuelle et annuelle mesurée sur PICHE en mm à la station d'Estancia Braz                          | 209 |
| 5-8  | Mesures de l'évaporation sur bacs à la station de Faja                                                          | 211 |
| 5-9  | Evapotranspiration potentielle d'après THORNTHWAITE                                                             | 212 |
| 5-10 | Comparaison des résultats obtenus par la formule de THORNTHWAITE avec ceux donnés par la formule de PENMAN      | 212 |
| 5-11 | Valeurs moyennes de l'évapotranspiration potentielle                                                            | 213 |
| 5-12 | Valeurs de l'ETP avec un gradient linéaire                                                                      | 213 |
| 5-13 | Pluviographie des bassins versants de l'île de Sao Nicolau (1978)                                               | 214 |
| 5-14 | Pluviographie des bassins versants de l'île de Sao Nicolau (1979)                                               | 215 |
| 5-15 | Pluviographie des bassins versants de l'île de Sao Nicolau (1980)                                               | 215 |
| 5-16 | Pluviographie des bassins versants de l'île de Sao Nicolau (1981)                                               | 216 |
| 5-17 | Pluviographie des bassins versants de l'île de Sao Nicolau (1982)                                               | 216 |
| 5-18 | Pluviographie des bassins versants de l'île de Sao Nicolau (1983)                                               | 217 |
| 5-19 | Lames d'eau précipitées pendant la saison des pluies durant la période 1978-1983 sur les bassins de Sao Nicolau | 221 |
| 5-20 | Pourcentages d'averses calculés pour différentes tranches de pluies journalières sur la période 1978-1983       | 224 |

|       |                                                                                                                   |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5-21  | Pourcentages d'averses calculés pour différentes tranches de précipitations journalières sur la période 1945-1950 | 226 |
| 6-1   | Inventaire des principaux événements pluviométriques pendant la période d'études                                  | 231 |
| 6-2   | Caractéristiques des jaugeages effectués sur la Ribeira Brava à Vila les 26 et 27-9-1978                          | 236 |
| 6-2-a | Jaugeages du 9-9-1980 (Ribeira Brava à Vila)                                                                      | 237 |
| 6-3   | jaugeages du 2-9-1981 (Ribeira Brava à Vila)                                                                      | 238 |
| 6-4   | Section mouillée et barèmes respectifs de la Ribeira Brava pour les crues du 2 et du 13 septembre 1981            | 239 |
| 6-5   | Liste des jaugeages effectués sur Ribeira Grande le 13-9-1981                                                     | 240 |
| 6-6   | Section mouillée et barème d'étalonnage de Ribeira Grande à Estancia Braz                                         | 241 |
| 6-7   | Caractéristiques des événements hydropluviométriques                                                              | 253 |
| 6-8   | L.S-1 km-2 (Ribeira Brava ET R. Grande)                                                                           | 268 |
| 6-9   | Caractéristiques de la crue décennale                                                                             | 270 |
| 6-10  | Autre détermination de la crue décennale                                                                          | 271 |
| 6-11  | Méthode graphique de prédétermination de la crue décennale                                                        | 272 |
| 6-12  | Comparaison des trois méthodes de prédétermination de la crue décennale                                           | 276 |
| 7-1   | Ribeira Brava à Vila : transports solides - crue du 26 septembre 1978                                             | 283 |
| 7-2   | Ribeira Brava à Vila : transports solides - crue du 2 septembre 1981                                              | 284 |
| 7-3   | Ribeira Brava à Vila : transports solides - crue du 13 septembre 1981 (1ère crue)                                 | 284 |
| 7-4   | Ribeira Grande : transports solides - crue du 13 septembre 1981                                                   | 285 |
| 7-5   | Granulométrie des dépôts de la Ribeira Joao (26-9-78)                                                             | 286 |
| 7-6   | Granulométrie de la partie fine des échantillons de la Ribeira Joao en 1978                                       | 287 |
| 7-7   | Répartition minéralogique des prélèvements de la Ribeira Joao en 1978                                             | 288 |
| 7-8-a | Analyses diffractométriques de Sao Nicolau (sept. 1981)                                                           | 289 |
| 7-8-b | Analyses diffractométriques de Sao Nicolau sur fraction inférieure à 2 $\mu$ (lames orientées)                    | 290 |
| 7-9   | Monte Gordo - Casa - Capteur de brouillard (1981)                                                                 | 303 |
| 7-10  | Monte Gordo - Casa - Capteur de brouillard (1982)                                                                 | 303 |
| 7-11  | Monte Gordo - Casa - Capteur de brouillard (1983)                                                                 | 304 |
| 7-12  | Monte Gordo - Casa - Capteur de brouillard (1984)                                                                 | 304 |

|      |                                                                                                       |     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7-13 | Monte Gordo - Caminho - Capteur de brouillard (1981)                                                  | 305 |
| 7-14 | Monte Gordo - Caminho- Capteur de brouillard (1982)                                                   | 305 |
| 7-15 | Monte Gordo - Caminho - Capteur de brouillard (1983)                                                  | 306 |
| 7-16 | Monte Gordo - Caminho - Capteur de brouillard (1984)                                                  | 306 |
| 8-1  | Bilan hydrologique sur le bassin de la Ribeira Brava                                                  | 320 |
| 8-2  | Bilan hydrologique sur le bassin de la Ribeira Grande                                                 | 320 |
| 8-3  | Recharge des nappes pour la période 1978-1983                                                         | 323 |
| 8-4  | Comparaison entre les résultats du calcul et les observations de l'infiltration cumulée sur 1978-1983 | 323 |
| 8-5  | Termes du bilan hydrologique (avec RFU = 50 mm)                                                       | 324 |
| 8-6  | Termes du bilan hydrologique (avec RFU = 50 mm) suite                                                 | 325 |
| 8-7  | Infiltration moyenne annuelle avec une RFU de 50 mm                                                   | 325 |
| 8-8  | Analyses chimiques des eaux souterraines à Sao Nicolau                                                | 340 |
| 8-9  | Analyses chimiques des eaux souterraines à Sao Nicolau                                                | 341 |
| 8-10 | Analyses d'eau - Prélèvement du 9 juin 1982                                                           | 342 |
| 8-11 | Analyse du chlorure des pluies                                                                        | 346 |
| 8-12 | Analyses isotopiques                                                                                  | 348 |
| 8-13 | Analyses isotopiques                                                                                  | 348 |

## TABLE DES MATIERES

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| AVANT-PROPOS                                                                               | 7         |
| INTRODUCTION                                                                               | 9         |
| <b>PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DE L'ARCHIPEL DU CAP-VERT ET DE L'ILE DE SAO NICOLAU</b> | <b>11</b> |
| CHAPITRE I : L'ARCHIPEL DES ILES DU CAP-VERT                                               | 13        |
| 1. GENERALITES                                                                             | 15        |
| 2. APERCU GEOGRAPHIQUE                                                                     | 16        |
| 3. GEOLOGIE DE L'ARCHIPEL DU CAP-VERT                                                      | 20        |
| 3-1. <u>Les origines</u>                                                                   | 20        |
| 3-2. <u>L'histoire géologique</u>                                                          | 20        |
| 3-3. <u>Description géologique et hydrogéologique des différentes séries</u>               | 23        |
| 3-3.1. Complexe éruptif interne ancien (CA)                                                | 23        |
| 3-3.2. Les brèches de base du Miocène (FI et CB)                                           | 24        |
| 3-3.3. Base de la série intermédiaire (Mi, Ci)                                             | 24        |
| 3-3.4. Pillow-lavas de la série intermédiaire (LRi, LRs)                                   | 25        |
| 3-3.5. Les coulées de la série intermédiaire (PA, M)                                       | 25        |
| 3-3.6. Dernières grandes coulées: (A)                                                      | 25        |
| 3-3.7. La série récente (MV)                                                               | 26        |
| 3-3.8. Alluvions                                                                           | 26        |
| 3-3.9. Schéma hydrogéologique général                                                      | 26        |
| 4. LES TRAITs PRINCIPAUX DU CLIMAT                                                         | 29        |
| 4-1. <u>Les mécanismes du climat</u>                                                       | 29        |
| 4-2. <u>Observations climatiques</u>                                                       | 36        |
| 4-3. <u>Les sécheresses</u>                                                                | 40        |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5. LA COUVERTURE VEGETALE DANS L'ARCHIPEL                                                                       | 46  |
| 5-1. <u>Une végétation naturelle pauvre</u>                                                                     | 46  |
| 5-2. <u>Les étages de la végétation</u>                                                                         | 46  |
| 5-3. <u>La reforestation</u>                                                                                    | 47  |
| 5-4. <u>Principales espèces ligneuses</u>                                                                       | 50  |
| 5-5. <u>Les plantes cultivées</u>                                                                               | 59  |
| 6. CONCLUSION                                                                                                   | 60  |
| CHAPITRE II : GENERALITES SUR L'ILE DE SAO NICOLAU                                                              | 65  |
| 1. APERCU GEOGRAPHIQUE DE L'ILE DE SAO NICOLAU ET DE SON AGRICULTURE                                            | 68  |
| 2. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE DE SAO NICOLAU                                                                     | 78  |
| 2-1. <u>Esquisse géologique</u>                                                                                 | 78  |
| 2-2. <u>Interprétation géomorphologique et géostructurale</u>                                                   | 78  |
| 2-3. <u>Hydrogéologie sommaire</u>                                                                              | 83  |
| 2-4. <u>La mise en valeur des eaux souterraines</u>                                                             | 84  |
| CHAPITRE III : LE REGIME DES PRECIPITATIONS A SAO NICOLAU                                                       | 99  |
| 1. GENERALITES                                                                                                  | 101 |
| 1-1. <u>Le réseau pluviométrique</u>                                                                            | 101 |
| 2. HAUTEURS DE PRECIPITATIONS ANNUELLES                                                                         | 103 |
| 2-1. <u>Les données brutes</u>                                                                                  |     |
| 2-1.1. Examen des données                                                                                       | 103 |
| 2-1.2. Contrôle de l'homogénéité des séries par la méthode de comparaison des totaux cumulés annuels            | 104 |
| 2-2. <u>Essai de reconstitution de séries chronologiques homogènes des hauteurs de précipitations annuelles</u> | 107 |
| 2-2.1. Corrélation sur les données brutes de données                                                            | 107 |
| 2-2.2. Corrélation entre Vila et les autres stations pour les années à relevés complets                         | 109 |

|                                                                                                    |                                                                                                                 |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2-3                                                                                                | <u>Comparaison des moyennes partielles aux diverses stations</u>                                                | 112 |
| 2-4                                                                                                | <u>Estimation de la hauteur interannuelle des précipitations reçues aux différentes stations de Sao Nicolau</u> | 114 |
| 2-5                                                                                                | <u>Répartition spatiale des précipitations annuelles moyennes</u>                                               | 115 |
| 2-5.1.                                                                                             | Carte des isohyètes interannuelles                                                                              | 115 |
| 2-5.2.                                                                                             | Volume des apports des précipitations en année moyenne                                                          | 117 |
| 2-5.3.                                                                                             | La "normale" des précipitations annuelles                                                                       | 117 |
| 2-6.                                                                                               | <u>Etude fréquentielle des précipitations annuelles</u>                                                         | 118 |
| 2-6.1.                                                                                             | Généralités                                                                                                     | 118 |
| 2-6.2.                                                                                             | Les résultats                                                                                                   | 119 |
| 2-7.                                                                                               | <u>Variation de la pluviométrie à Sao Nicolau</u>                                                               | 125 |
| <b>3. LA REPARTITION DES PLUIES DANS L'ANNEE</b>                                                   |                                                                                                                 | 130 |
| 3-1.                                                                                               | <u>Hauteurs mensuelles de précipitations</u>                                                                    | 130 |
| 3-2.                                                                                               | <u>Le nombre moyen de jours de pluie</u>                                                                        | 135 |
| 3-3.                                                                                               | <u>Les précipitations mensuelles observées de 1979 à 1983</u>                                                   | 136 |
| 3-4.                                                                                               | <u>Le climat aride de Sao Nicolau</u>                                                                           | 136 |
| <b>4. PRECIPITATIONS JOURNALIERES</b>                                                              |                                                                                                                 | 143 |
| 4-1.                                                                                               | <u>Etude fréquentielle des précipitations journalières maximales</u>                                            | 143 |
| 4-2.                                                                                               | <u>Intensité des précipitations</u>                                                                             | 149 |
| <b>DEUXIEME PARTIE : ETUDE DE DEUX BASSINS REPRESENTATIFS DE L'ILE DE SAO NICOLAU</b>              |                                                                                                                 | 153 |
| <b>CHAPITRE IV : PRESENTATION DES BASSINS ETUDIES ET DE LEURS EQUIPEMENTS HYDROMETEOROLOGIQUES</b> |                                                                                                                 | 157 |
| <b>1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET DESCRIPTION DES BASSINS</b>                                    |                                                                                                                 | 159 |
| 1-1.                                                                                               | <u>Morphologie et relief</u>                                                                                    | 159 |
| 1-2.                                                                                               | <u>Le réseau hydrographique</u>                                                                                 | 163 |
| 1-3.                                                                                               | <u>Géologie des bassins</u>                                                                                     | 170 |

|                                                                                                     |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 2. EQUIPEMENT DES BASSINS ET CONTENU PREVISIONNEL DES TRAVAUX                                       | 181     |
| 2-1. <u>Le réseau de mesures</u>                                                                    | 181     |
| 2-1.1. Stations hydrométriques                                                                      | 181     |
| 2-1.2. Le réseau pluviométrique                                                                     | 182     |
| 2-1.3. Les stations météorologiques                                                                 | 185     |
| 2-1.4. Autres équipements sur le terrain                                                            | 186     |
| 2-2. <u>La mission hydrologique de Vila</u>                                                         | 189     |
| 2-2.1. Ses moyens                                                                                   | 189     |
| 2-2.2. Les intervenants                                                                             | 190     |
| 2-2.3. Difficultés rencontrées                                                                      | 190     |
| 2-3. <u>Contenu prévisionnel des travaux</u>                                                        | 191     |
| <br>CHAPITRE V : DONNEES CLIMATOLOGIQUES ET PLUVIOMETRIQUES<br>RECUEILLIES SUR LES BASSINS ETUDIES  | <br>195 |
| 1. DONNEES CLIMATOLOGIQUES DE FAJA ET ESTANCIA BRAZ                                                 | 197     |
| 1-1. <u>Les vents</u>                                                                               | 197     |
| 1-2. <u>Les températures</u>                                                                        | 198     |
| 1-2.1. Les observations                                                                             | 198     |
| 1-2.2. Gradient altimétrique                                                                        | 204     |
| 1-3. <u>L'humidité relative</u>                                                                     | 205     |
| 1-4. <u>L'évaporation</u>                                                                           | 208     |
| 1-4.1. Evaporation piche                                                                            | 208     |
| 1-4.2. Evaporation sur bac                                                                          | 210     |
| 1-4.3. Formules de calcul de l'évapotranspiration                                                   | 211     |
| 1-4.4. Conclusions                                                                                  | 213     |
| <br>2. PRECIPITATIONS OBSERVEES SUR LES BASSINS DE LA R. GRANDE ET<br>DE LA R. BRAVA DE 1978 A 1983 | <br>214 |
| 2-1. <u>Les observations</u>                                                                        | 214     |
| 2-2. <u>Lames d'eau précipitées</u>                                                                 | 221     |

|                                                                                           |                                                                                        |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2-3.                                                                                      | <u>Gradient pluviométrique</u>                                                         | 223 |
| 2-4.                                                                                      | <u>Classement des hauteurs journalières de pluie</u>                                   | 224 |
| CHAPITRE VI : LES EVENEMENTS HYDROPLUVIOMETRIQUES OBSERVES<br>SUR LES BASSINS (1978-1983) |                                                                                        | 229 |
| 1.                                                                                        | INVENTAIRE DES EVENEMENTS                                                              | 231 |
| 2.                                                                                        | MESURES DES DEBITS                                                                     | 233 |
| 2-1.                                                                                      | <u>Mesures de débit sur la RIBEIRA BRAVA à VILA</u>                                    | 235 |
| 2-2.                                                                                      | <u>Mesures de débit sur la RIBEIRA GRANDE à ESTANCIA BRAZ</u>                          | 239 |
| 3.                                                                                        | DESCRIPTION DES EVENEMENTS HYDROPLUVIOMETRIQUES                                        | 242 |
| 3-1.                                                                                      | <u>Les crues du 26 septembre 1978</u>                                                  | 242 |
| 3-1.1.                                                                                    | A VILA DE RIBEIRA BRAVA                                                                | 242 |
| 3-1.2.                                                                                    | La crue du 26 septembre 1978 à ESTANCIA BRAZ sur la<br>RIBEIRA GRANDE                  | 244 |
| 3-2.                                                                                      | <u>La crue du 21 juillet 1979 à VILA DA RIBEIRA BRAVA</u>                              | 245 |
| 3-3.                                                                                      | <u>Les crues du 9 septembre 1980</u>                                                   | 246 |
| 3-3.1.                                                                                    | Sur la RIBEIRA BRAVA                                                                   | 246 |
| 3-3.2.                                                                                    | Sur la RIBEIRA GRANDE                                                                  | 248 |
| 3-4.                                                                                      | <u>Les crues du 2 septembre 1981</u>                                                   | 248 |
| 3-4.1.                                                                                    | A VILA DA RIBEIRA BRAVA                                                                | 248 |
| 3-4.2.                                                                                    | Sur la RIBEIRA GRANDE                                                                  | 249 |
| 3-5.                                                                                      | <u>Les crues du 13 septembre 1981</u>                                                  | 250 |
| 3-5.1.                                                                                    | Sur la RIBEIRA BRAVA                                                                   | 250 |
| 3-5.2.                                                                                    | Sur la RIBEIRA GRANDE                                                                  | 251 |
| 3-6.                                                                                      | <u>La crue du 29 août 1982 a VILA DA RIBEIRA BRAVA</u>                                 | 252 |
| 3-7.                                                                                      | <u>La crue du 1er octobre 1983 sur la RIBEIRA GRANDE</u>                               | 252 |
| 3-8.                                                                                      | <u>Les principaux événements pluviométriques n'ayant<br/>pas entraîné d'écoulement</u> | 255 |
| 4.                                                                                        | ANALYSE DES RESULTATS                                                                  | 263 |

|                                                                                  |                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4-1.                                                                             | <u>Les conditions de genèse des crues</u>                                                    | 263 |
| 4-1.1.                                                                           | Analyse des crues de la RIBEIRA BRAVA à VILA                                                 | 263 |
| 4-1.2.                                                                           | Analyses des crues de la RIBEIRA GRANDE<br>à ESTANCIA BRAZ                                   | 268 |
| 4-2.                                                                             | <u>Prédétermination de crues - Calcul de la crue décennale</u>                               | 268 |
| CHAPITRE VII: AUTRES MESURES EFFECTUEES SUR LES BASSINS ETUDIES<br>A SAO NICOLAU |                                                                                              | 279 |
| 1.                                                                               | MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES ET EROSION                                                     | 281 |
| 1-1.                                                                             | <u>Généralités et méthodologie</u>                                                           | 281 |
| 1-2.                                                                             | <u>Mesures quantitatives de transports solides</u>                                           | 283 |
| 1-2.1.                                                                           | La crue du 26 septembre 1978                                                                 | 283 |
| 1-2.2.                                                                           | La crue du 2 septembre 1981                                                                  | 284 |
| 1-2.3.                                                                           | La crue du 13 septembre 1981                                                                 | 284 |
|                                                                                  | 1-2.3.1. Sur la RIBEIRA BRAVA                                                                | 284 |
|                                                                                  | 1-2.3.2. Sur la RIBEIRA GRANDE                                                               | 285 |
| 1-2.4.                                                                           | Bilan global des exportations de matières solides en<br>suspension sur la période 1978-1983. | 286 |
| 1-3.                                                                             | <u>Mesures qualitatives sur les transports solides</u>                                       | 286 |
| 1-3.1.                                                                           | Granulométrie et minéralogie des dépôts de<br>la RIBEIRA JOAO (26 Septembre 1978)            | 286 |
| 1-3.2.                                                                           | Diffraction X des suspensions recueillies<br>lors des crues de 1981                          | 289 |
| 1-4.                                                                             | <u>Conclusions</u>                                                                           | 294 |
| 2.                                                                               | MESURE DES PRECIPITATIONS OCCULTES AU MONTE GORDO                                            | 299 |
| 2-1.                                                                             | <u>Généralités</u>                                                                           | 299 |
| 2-2.                                                                             | <u>Les capteurs de brouillard</u>                                                            | 300 |
| 2-3.                                                                             | <u>L'expérimentation du MONTE GORDO</u>                                                      | 302 |
| 2-3.1.                                                                           | Implantation des capteurs                                                                    | 302 |
| 2-3.2.                                                                           | Les données                                                                                  | 302 |
| 2-3.3.                                                                           | Analyse des résultats                                                                        | 307 |
| 2-3.4.                                                                           | Recherche de corrélation                                                                     | 308 |

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2-3.5. Conclusions                                                                                                                 | 311 |
| CHAPITRE VIII : BILANS HYDROLOGIQUES ET RESSOURCES SOUTERRAINES                                                                    | 315 |
| 1. BILAN HYDROLOGIQUE ET INFILTRATION                                                                                              | 317 |
| 1-1. <u>Critique des bilans antérieurs</u>                                                                                         | 317 |
| 1-2. <u>Bilan hydrologique journalier</u>                                                                                          | 318 |
| 1-3. <u>Calcul des bilans de la R. BRAVA-et de la R. GRANDE sur la période 1978-1983</u>                                           | 319 |
| 1-4. <u>Essai de calcul des bilans sur les bassins étudiés à partir des chroniques journalières de précipitations (1945-1983).</u> | 322 |
| 1-5. <u>Conclusions sur l'étude des bilans</u>                                                                                     | 327 |
| 2. L'ETAT DES RESSOURCES SOUTERRAINES                                                                                              | 329 |
| 2-1. <u>Evolution du débit des sources</u>                                                                                         | 329 |
| 2-2. <u>La nappe de CAMPO DA PREGUICA</u>                                                                                          | 332 |
| 2-3. <u>La nappe de la vallée de FAJA</u>                                                                                          | 334 |
| 3. LA QUALITE DES EAUX A SAO NICOLAU                                                                                               | 339 |
| 3-1. <u>Les analyses chimiques</u>                                                                                                 | 339 |
| 3-2. <u>Analyses isotopiques</u>                                                                                                   | 347 |
| 3-2.1. Analyses sur 18 O                                                                                                           | 347 |
| 3-2.2. Teneur en radio carbone d'eaux souterraines                                                                                 | 350 |
| CONCLUSIONS GENERALES                                                                                                              | 355 |
| Bibliographie                                                                                                                      | 359 |
| Liste des figures                                                                                                                  | 363 |
| Liste des tableaux                                                                                                                 | 369 |
| Tables des matières                                                                                                                |     |

*O.R.S.T.O.M. Editions*  
*Dépot légal 2<sup>o</sup> Trimestre 1989*  
*Impression Office d'Édition de la Recherche*  
*Scientifique et Coopération Internationale*  
*O.R.S.T.O.M. Editeur*

ISSN : 0767-2888  
ISBN : 2-7099-0946-4  
Editions de l'ORSTOM  
70, route d'Aulnay F 93143 BONDY Cedex