

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

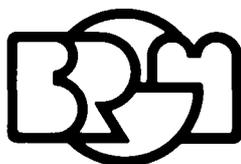
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.34.34

ÉVALUATION GLOBALE DE LA RESSOURCE EN EAU DE L'ILE DE LA RÉUNION

Apports de la simulation par modèles hydrologiques

par

A. BARGEAS



Département EAU

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.34.34

Rapport du B.R.G.M.

84 SGN 232 EAU/REU

Décembre 1984

*Mon île, tu n'es pas l'île enchantée
que l'on fait miroiter dans la presse
aux riches des riches pays*

(...)

*et tu caches bien ta beauté
au fond de tes cirques, où bat ton cœur*

(...)

*Le long des côtes sauvages
le charme fou des paysages
laisse au voyageur de passage
une singulière image
mêlée de bleu, de noir, de blanc,
de soleil or et de rouge sang.*

*Mon île, tu as réuni dans ton cœur
des gens de toutes les couleurs
comme un défi au monde entier.*

(...)

*Mon plus beau livre d'image,
c'est celui qui porte ton nom,
mon île de La Réunion.*

Extrait de : "Mon île" (J. FARREYROL)

AVANT-PROPOS

Ces travaux résultent de la collaboration entre l'Institut de Géodynamique de Bordeaux III et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.). Ils ont eu successivement pour cadre le Service Géologique de La Réunion et le département de l'Eau du B.R.G.M. à Orléans.

Le but initial de ces travaux était l'équipement du bassin versant témoin du Dos d'Ane et l'exploitation des différentes données collectées sur ce site. La taille réduite de ce bassin (3 km²) et la mise en place récente de son équipement nous ont incité à envisager l'approche globale du bilan hydrologique au niveau de l'île de La Réunion.

Après l'inventaire et la collecte des données (réseau climatique dense et par contre mesures hydrométriques très discontinues dans le temps et dans l'espace), nous nous sommes orientés, dans un premier temps, vers l'analyse régionale assez précise des flux d'eau entrant dans les systèmes hydrologiques (étape nous paraissant fondamentale avant toute étude complète du bilan d'eau).

Il nous a ensuite paru important de ne pas négliger les mesures hydrométriques, dont nous pouvions disposer, qui constituent le seul élément de contrôle des apports en eau que nous venions d'évaluer.

Les modèles globaux de simulation hydrologique nous ont permis d'exploiter efficacement les données disponibles. Outre la vérification des données climatiques, nous avons pu ainsi étudier le comportement hydrologique des bassins à des pas de temps cohérents avec les temps de réponses de ces systèmes.

Ce rapport est également publié sous forme de thèse de 3^{me} cycle intitulée : "Apports de la simulation par modèles analogiques - Application à l'évaluation globale de la ressource en eau de l'île de La Réunion", et soutenue le 15 juin 1984 à l'Université de Bordeaux III.

ÉVALUATION GLOBALE
DE LA RESSOURCE EN EAU DE L'ILE DE LA RÉUNION
APPORTS DE LA SIMULATION PAR MODELES HYDROLOGIQUES

Mots clés : Ile de La Réunion - Volcanisme - Bilan d'eau - Analyse en
composante principale - Modèle de simulation hydrologique

R E S U M E

Les modèles globaux de simulation hydrologique permettent, à partir des données climatiques de hauteurs de pluie et d'évapotranspiration, de calculer des lames d'eau écoulées sur les bassins étudiés. La comparaison des séries de débits calculées et mesurées (bassins jaugés) permet de juger de la qualité de l'ajustement obtenu. Le pas de temps de ces études, mensuel ou journalier, leur donne plus de crédit que la simple confrontation de valeurs annuelles.

La qualité de l'ajustement témoigne d'une relative précision dans l'évaluation des données d'entrée et dans la définition des différents paramètres du modèle qui interviennent dans la schématisation du comportement hydrologique du bassin (lois régissant l'alimentation et la vidange successive de différents réservoirs).

Les modèles nous permettent donc d'apprécier, à l'échelle des bassins étudiés, la qualité de l'évaluation de la pluie efficace que nous calculons par ailleurs sur l'ensemble de l'île.

*
* *

Aussi, après une présentation rapide de l'île de la Réunion, nous reprenons l'inventaire des différentes données hydroclimatiques disponibles, qui nous a permis de définir le cadre spatio-temporel de notre étude et la méthode d'approche globale de la ressource en eau.

L'île de La Réunion est ainsi découpée en mailles régulières de 3 km de côté. En chacune de ces mailles, on évalue sur la chronique retenue, la période 1971-1981, les valeurs mensuelles des apports en eau constituées par les pluies et des reprises par évapotranspiration, ainsi que la capacité de rétention en eau du sol. Ces différentes données sont ensuite confrontées pour définir des apports mensuels nets, disponibles, pour l'écoulement.

*
* *

Bien qu'abondamment mesurées (environ 130 postes pluviométriques), les hauteurs de précipitation à La Réunion n'en sont pas moins extrêmement variables, tant dans l'espace que dans le temps. L'extension de ces données doit reposer sur une bonne compréhension préalable de leur répartition que les facteurs physiques, tels l'exposition au vent et l'altitude, ne suffisent à résumer. L'analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur ces données permet de dégager 5 types de comportements pluviométriques à La Réunion. La transformation préalable des données (profilage) permet de s'affranchir de l'effet d'abondance lié à la pluviosité différentielle des différents mois sur l'ensemble de l'île et facilite l'interprétation de l'ACP. Les résultats de cette analyse servent de support à l'extension des données (application des relations réciproques entre les variables et les composantes).

En fonction des données disponibles, l'évapotranspiration potentielle est calculée par la formule mensuelle de Turc. L'extension des données de température repose sur l'application des régressions linéaires définies mensuellement entre ce facteur climatique et l'altitude (très bonne liaison vérifiée à chaque pas de temps). L'insolation, par contre, n'obéit pas à de telles relations, le minimum d'insolation annuel est mesuré dans les zones d'altitude moyenne (1000 à 1500 m) de la côte "sous le vent". Nous avons utilisé les résultats d'une ACP qui s'avère cependant beaucoup moins fructueuse que pour les pluies. La relative incertitude locale sur l'évaluation de ces facteurs climatiques, température et insolation, entraîne sur la valeur de l'ETP une incertitude de l'ordre de précision de la formule considérée (10 à 20 %).

*
**

Le bilan d'eau mensuel réalisé au sol à partir des différentes données (pluie, ETP, capacité de rétention en eau du sol) nous permet de constituer un fichier des précipitations efficaces mensuelles aux 304 mailles retenues. La répartition de ces pluies efficaces apparaît grossièrement homothétique à celle des pluies tant dans l'espace que dans le temps. L'étude fréquentielle montre que la côte "sous le vent" est nettement défavorisée par rapport à la côte "au vent". Une année sur dix, cette région ne reçoit pas de pluie efficace, donc pas de recharge des différents réservoirs tant naturels qu'artificiels, d'où des problèmes importants pour l'alimentation en eau des populations. C'est dans ces régions que la définition des différentes valeurs d'ETP, de capacité de rétention en eau du sol, demande le plus de précision.

L'approche d'un bilan global considérant les valeurs moyennes, à l'échelle d'une unité donnée, de lame d'eau, de hauteur d'eau reprise par évapotranspiration et de réserve en eau du sol, donne des valeurs très proches de celles obtenues par l'étude du bilan en chacune des mailles constituant cette unité. Par contre, l'évaluation de la pluie efficace, par application de régressions linéaires établies avec la pluie, reste très grossière.

*
**

Les lames d'eau estimées par cette approche globale sur l'île permettent de réaliser de bonnes simulations avec les modèles globaux utilisés, et, si quelques incertitudes demeurent, elles sont liées à des insuffisances du réseau pluviométrique. Il n'a pas été possible, par contre, d'améliorer la précision dans l'évaluation de l'ETP qui reste de l'ordre de 10 à 20 %, ni de définir la capacité de rétention de la réserve en eau du sol, même si la majorité des exemples étudiés aboutissent à des valeurs comprises entre 50 et 150 mm.

Ces modèles permettent de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique des bassins. Ils montrent la prépondérance de tel ou tel type d'écoulement. Ils mettent en évidence des phénomènes de fuite par infiltration profonde ou de transfert d'eau souterraine entre bassins. Il apparaît que la nature géologique des formations affleurantes joue un rôle déterminant dans le transfert de l'eau au niveau des bassins.

Les principaux contrastes climatiques étant d'ordre saisonnier, il s'avère que les modèles à pas de temps mensuel sont tout-à-fait aptes à décrire le fonctionnement hydrologique des bassins de La Réunion, même si les précipitations intenses et les crues associées sont plutôt d'ordre journalier.

SOMMAIRE

	pages
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>1^{re} PARTIE - PRESENTATION GENERALE DE L'ILE DE LA REUNION</u>	
ET DE LA METHODE D'APPROCHE GLOBALE DE LA RESSOURCE	
EN EAU	7
<u>1. TRAITS GENERAUX DE L'ILE DE LA REUNION</u>	9
1.1. <i>Présentation rapide</i>	9
1.2. <i>Géologie</i>	11
1.3. <i>Hydrogéologie</i>	16
1.3.1. <i>Exploitation des eaux souterraines à La Réunion</i>	19
1.3.2. <i>Paramètres hydrodynamiques</i>	20
1.3.3. <i>Conclusion</i>	22
1.4. <i>Pédologie</i>	23
1.5. <i>Végétation</i>	25
<u>2. INVENTAIRE DES DONNEES HYDROCLIMATIQUES DE L'ILE DE LA REUNION</u>	28
2.1. <i>Inventaire des données climatologiques</i>	28
2.1.1. <i>Pluviométrie</i>	28
2.1.2. <i>Température</i>	30
2.1.3. <i>Insolation et radiation solaire</i>	32
2.1.4. <i>Autres paramètres</i>	33
2.2. <i>Inventaire des données hydrométriques</i>	33
2.3. <i>Inventaire des données relatives aux eaux souterraines</i>	35
<u>3. METHODOLOGIE D'APPROCHE GLOBALE DE LA RESSOURCE RENOUVELABLE</u>	
<u>EN EAU SUR L'ENSEMBLE DE L'ILE</u>	37
3.1. <i>Cadre spatio-temporel de l'étude</i>	37
3.1.1. <i>Dimension des mailles</i>	38
3.1.2. <i>Période de référence</i>	39
3.1.3. <i>Pas de temps</i>	41
3.2. <i>Extension des données</i>	41
<u>BIBLIOGRAPHIE DE LA 1^{re} PARTIE</u>	43
<u>ANNEXES</u>	47

<u>2me PARTIE - EVALUATION DES APPORTS EN EAU - REPARTITION</u>	
MENSUELLE DE LA PLUIE SUR L'ENSEMBLE DE L'ILE	
PERIODE 1971-1981	51
1. <u>CRITIQUE DES DONNEES</u>	54
2. <u>ESTIMATIONS POUR LES VALEURS MANQUANTES</u>	56
3. <u>REPARTITION SPATIALE DES PLUIES A LA REUNION</u>	58
3.1. Exposition aux vents dominants	59
3.2. Relations avec l'altitude	61
4. <u>APPORT DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP) COMME</u>	
<u>GUIDE D'INTERPRETATION CLIMATIQUE</u>	63
4.1. Généralités	63
4.2. Analyse des variables profilées à La Réunion	67
4.2.1. Etude des valeurs mensuelles profilées	71
4.2.2. Etude de la pluviométrie mensuelle	74
4.2.3. Contexte climatologique de l'île de La Réunion	77
4.2.4. Conclusion	78
5. <u>EXTENSION DES DONNEES DANS L'ESPACE - APPLICATION DES RESULTATS</u>	
<u>DE L'A.C.P.</u>	81
5.1. Diverses méthodes d'exploitation spatiale des données	81
5.2. Application de la méthode des stations témoins	82
6. <u>RESULTATS</u>	84
6.1. Valeurs mensuelles des hauteurs de pluie à La Réunion	84
6.2. Critique de la méthode	86
7. <u>CONCLUSIONS</u>	87
<u>BIBLIOGRAPHIE DE LA 2me PARTIE</u>	89
<u>ANNEXES</u>	91

<u>3me PARTIE - EVALUATION DE LA REPRISE PAR EVAPOTRANSPIRATION</u>	
APPROCHE DE L'E.T.P. PAR LA FORMULE MENSUELLE DE TURC	
SUR L'ENSEMBLE DE L'ILE - PERIODE 1971-1981	
	115
1. <u>POURQUOI L'APPROCHE DE L'E.T.P. PAR LA FORMULE DE TURC ?</u>	118
1.1. <i>Différentes méthodes d'approche</i>	118
1.1.1. <i>Mesures in situ</i>	119
1.1.2. <i>Formules empiriques</i>	119
1.1.3. <i>Méthodes basées sur le bilan énergétique et le bilan hydrique</i>	120
1.1.4. <i>Etudes comparatives</i>	122
1.2. <i>Données disponibles à La Réunion</i>	123
1.3. <i>Conclusion - Méthode adoptée</i>	125
2. <u>ETUDE DE LA REPARTITION DE LA TEMPERATURE A LA REUNION</u>	127
2.1. <i>Critique des données</i>	127
2.2. <i>Estimation pour les valeurs manquantes</i>	127
2.3. <i>Distribution mensuelle des températures</i>	127
2.4. <i>Répartition spatiale - Relation avec l'altitude</i>	129
2.4.1. <i>Etude sur les valeurs moyennes interannuelles</i>	129
2.4.2. <i>Etude mensuelle sur la période 1971-1981</i>	129
2.5. <i>Extension des données</i>	132
3. <u>ETUDE DE LA REPARTITION DE L'INSOLATION A LA REUNION</u>	133
3.1. <i>Critique des données</i>	133
3.2. <i>Restitution pour les valeurs manquantes</i>	133
3.3. <i>Répartition spatiale de l'insolation</i>	133
3.3.1. <i>Traits généraux</i>	133
3.3.2. <i>Relations avec l'altitude</i>	136
3.3.3. <i>Analyse en composantes principales</i>	139
3.3.4. <i>Extension dans l'espace</i>	140
3.4. <i>Conclusion</i>	141
4. <u>ETUDE DE LA REPARTITION DES AUTRES FACTEURS CLIMATIQUES A LA REUNION</u>	142
4.1. <i>Vent</i>	143
4.2. <i>Humidité relative</i>	144
4.3. <i>Evaporation</i>	144
4.3.1. <i>Evaporomètre PICHE</i>	144
4.3.2. <i>Bac à évaporation de classe A</i>	144

5. <u>ETUDE CRITIQUE DE L'E.T.P. CALCULEE PAR LA FORMULE DE TURC</u>	147
5.1. <i>Distribution spatiale et temporelle de l'E.T.P. sur la période 1971-1981</i>	147
5.2. <i>Influence d'une incertitude concernant les facteurs climatiques sur l'E.T.P.</i>	150
5.3. <i>Comparaison à d'autres indices d'évaporation et évapotranspiration.</i>	151
5.3.1. <i>Comparaison à ETP mesuré</i>	151
5.3.2. <i>Comparaison à évaporation BAC</i>	151
5.3.3. <i>Comparaison à évaporation "Piche"</i>	152
6. <u>CONCLUSIONS</u>	153
<u>BIBLIOGRAPHIE DE LA 3me PARTIE</u>	155
<u>ANNEXES</u>	159

<u>4me PARTIE</u> - LES MODELES GLOBAUX DE SIMULATION DES BASSINS HYDROLOGIQUES - LEUR APPLICATION POUR VERIFIER LES DONNEES D'ENTREE (PLUIE ET EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE) ET EVALUER LA CAPACITE DE LA RESERVE1 DISPONIBLE POUR L'EVAPOTRANSPIRATION	187
<u>1. LES MODELES GLOBAUX A RESERVOIRS</u>	190
1.1. Principe et schéma de fonctionnement	190
1.2. Calage des modèles	190
1.3. Applications des modèles	192
<u>2. APPLICATION A QUELQUES BASSINS VERSANTS DE LA REUNION</u>	193
2.1. Présentation sommaire des bassins	194
2.1.1. Rivière LANGEVIN - Massif de la Fournaise	194
2.1.2. Rivières de la côte au vent sur les hauts de St-Benoit	194
2.1.3. Rivières drainant les cirques du Piton des Neiges - Rivière du Mat et Bras de Cilaos	194
2.1.4. La Ravine à Marquet - Côte sous le vent	195
2.2. Simulations des écoulements mensuels	195
2.2.1. Mise en oeuvre	195
2.2.2. Résultats	197
<u>3. VERIFICATION DES DONNEES CLIMATIQUES</u>	204
3.1. Etudes des lames d'eau	204
3.1.1. Rivière Langevin	204
3.1.2. Rivière des Marsouins et Bras Cabot	206
3.1.3. Rivière des Roches et Grand Bras	211
3.1.4. Bras des Lianes et Bras Caverne	211
3.1.5. Rivière du Mât et Bras de Cilaos	212
3.1.6. Ravine à Marquet	213
3.2. Evapotranspiration potentielle	213
<u>4. EVALUATION DE LA CAPACITE GLOBALE DE RETENTION DU SOL</u>	214
4.1. Terminologie agronomique	214
4.2. La réserve globale en eau du sol au niveau des bassins versants	215
<u>5. CONCLUSION</u>	217
<u>BIBLIOGRAPHIE DE LA 4me PARTIE</u>	219
<u>ANNEXES</u>	221

<u>5me PARTIE - EVALUATION GLOBALE DE LA RESSOURCE EN EAU A LA REUNION</u>	
BILAN D'EAU AU SOL CALCULE AU PAS DE TEMPS MENSUEL SUR	
LA PERIODE 1971-1981 EN CHAQUE MAILLE DE L'ILE	233
<u>1. PLUIE EFFICACE OBTENUE EN CONSIDERANT UNE CAPACITE MAXIMALE</u>	
<u>DE RESERVE EN EAU DU SOL DE 100 MM UNIFORMEMENT SUR L'ENSEMBLE</u>	
<u>DE L'ILE</u>	236
1.1. <i>Distributions spatiale et temporelle des moyennes</i>	
<i>interannuelles</i>	236
1.1.1. <i>Distribution spatiale</i>	236
1.1.2. <i>Répartition mensuelle des valeurs moyennes de</i>	
<i>l'ETP et de la pluie efficace</i>	238
1.1.3. <i>Etudes ponctuelles du bilan</i>	240
1.2. <i>Etude fréquentielle</i>	243
<u>2. INFLUENCE REGIONALE DE DIFFERENTS FACTEURS SUR LES VALEURS DE</u>	
<u>LA PLUIE EFFICACE</u>	248
2.1. <i>Influence des valeurs de l'ETP</i>	248
2.2. <i>Influence de la capacité de la réserve en eau du sol</i>	250
2.2.1. <i>Etude globale de l'ensemble de l'île</i>	250
2.2.1. <i>Etude régionale</i>	254
2.3. <i>Influence du pas de temps</i>	257
2.3.1. <i>Différences sur les pluies efficaces en fonction du</i>	
<i>pas de temps sur l'ensemble de la période considérée</i>	
1971-1981	258
2.3.2. <i>Distribution mensuelle de l'écart entre les pluies</i>	
<i>efficaces obtenues à différents pas de temps</i>	258
2.3.3. <i>Influence cumulée de la capacité de la réserve en</i>	
<i>eau du sol et du pas de temps</i>	261
2.3.4. <i>Influence des hauteurs de pluies</i>	263
<u>3. APPROCHES SIMPLIFIEES DE LA PLUIE EFFICACE</u>	264
3.1. <i>Approche globale sur de petites unités géographiques</i>	264
3.2. <i>Relation entre les hauteurs des pluies et des pluies</i>	
<i>efficaces</i>	268
3.2.1. <i>Relations établies sur l'ensemble des 304 mailles</i>	268
3.2.2. <i>Relations établies sur les 132 valeurs d'une maille</i>	273
<u>4. CONCLUSION</u>	274
<u>BIBLIOGRAPHIE DE LA 4me PARTIE</u>	277
<u>ANNEXES</u>	279

<u>6me PARTIE</u> - LES MODELES GLOBAUX DE SIMULATION DES BASSINS HYDROLOGIQUES - FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE QUELQUES BASSINS VERSANTS DE LA REUNION	293
<u>1. ETUDE MENSUELLE DE LA RELATION PLUIE-DEBIT SUR DIFFERENTS BASSINS</u>	296
1.1. Les différentes composantes de l'écoulement intervenant dans le modèle GARDENIA	296
1.2. Importance relative des composantes de l'écoulement sur les différents bassins	298
1.2.1. Rivière Langevin	298
1.2.2. Rivière des Marsouins	301
1.2.3. Les autres bassins de la côte Est	304
1.2.4. Bras de Cilaos	310
1.2.5. Ravine à Marquet	311
1.3. Les différents termes du bilan d'eau approchés par les modèles globaux de simulation hydrologique sur plusieurs bassins de La Réunion	313
1.3.1. Conclusions relatives à la répartition des écoule- ments	313
1.3.2. Mise en évidence des phénomènes d'infiltration profonde	315
1.3.3. Approche quantitative du bilan d'eau sur quelques bassins de La Réunion	317
<u>2. ETUDE DU BASSIN TEMOIN DE DOS D'ANE</u>	320
2.1. Présentation générale	320
2.2. Approche mensuelle de la relation pluie-débit	323
2.2.1. Coefficient d'écoulement	323
2.2.2. Application du modèle GARDENIA	325
2.2.3. Extention des débits à la période 1967-1982	329
2.2.4. Influence de la lame d'eau	333
2.3. Approche journalière de la relation pluie-débit par le modèle AMANDE	333
2.4. Fonctionnement hydrologique du bassin de la Ravine à Marquet	341
2.4.1. Etude du tarissement	341
2.4.2. Etude sommaire des crues	344

2.4.3. Mesures diverses des écoulements souterrains en aval de l'écoulement du secteur de Dos d'Ane	345
2.4.4. Conclusions relatives à l'utilisation des modèles globaux à réservoirs	346
2.5. Etude de la piézométrie du forage de Grand Coin	347
2.5.1. Evolution générale	347
2.5.2. Etude des épisodes de remontée du niveau	348
2.5.3. Essai de simulation	350
2.6. Conclusion	353
<u>BIBLIOGRAPHIE DE LA 6me PARTIE</u>	357
<u>ANNEXES</u>	359
<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	377

LISTE DES FIGURES

	pages
<u>FIG. I.1</u> - Bilan hydrologique d'une unité spatiale isolée (île)	3
<u>FIG. I.2</u> - Situation de l'île de La Réunion	9
<u>FIG. I.3</u> - Répartition des affleurements des 2 édifices volcaniques et des vents dominants à La Réunion	10
<u>FIG. I.4a</u> - Carte géologique simplifiée à La Réunion	13
<u>FIG. I.4b</u> - Colonne lithostratigraphique schématique des formations volcaniques du Massif du Piton des Neiges	14
<u>FIG. I.5</u> - Récapitulation des différentes phases volcano-tectonique et hydrothermales de l'île de La Réunion	15
<u>FIG. I.6</u> - Esquisse d'un schéma hydraulique global des pentes externes du Piton des Neiges	18
<u>FIG. I.7</u> - Carte pédologique simplifiée de La Réunion	24
<u>FIG. I.8</u> - Exploitation des images LANDSAT - Ile de La Réunion	27
<u>FIG. I.9</u> - Implantation des postes pluviométriques à La Réunion	29
<u>FIG. I.10</u> - Implantation des postes thermométriques à la Réunion	31
<u>FIG. I.11</u> - Implantation des postes mesurant divers paramètres climatologiques	32
<u>FIG. I.12</u> - Réseau hydrographique réunionnais et implantation des stations de jaugeages	34
<u>FIG. I.13</u> - Relevés piézométriques effectués par le SGR Réunion	36
<u>FIG. I.14</u> - Découpages de l'île de La Réunion en mailles de 3 km de côté	39

*
* *

<u>FIG. II.1</u>	- Nombre de lacunes sur les hauteurs de pluie mensuelle aux postes pluviométriques, et relations linéaires entre ces stations sur la période 1971-1981	55
<u>FIG. II.2</u>	- Isohyètes moyennes interannuelles en mètres Période 1951-1980	58
<u>FIG. II.3</u>	- Evolution des hauteurs moyennes de pluies le long du profil de St-Benoît - St-Pierre	59
<u>FIG. II.4</u>	- Etude sectorielle de la relation entre les hauteurs de pluie mensuelle et l'altitude	62
<u>FIG. II.5</u>	- Hauteurs de pluie mensuelle à La Réunion - Période 1971-1981 Valeurs moyennes des 109 stations retenues	64
<u>FIG. II.6</u>	- Valeurs mensuelles et mensuelles profilées centrées réduites des hauteurs de pluie à la station de St-Philippe (1971-1981)	67
<u>FIG. II.7</u>	- Isovaleurs des coefficients de corrélation vis-à-vis des composantes principales et des pluies profilées	69-70
<u>FIG. II.8</u>	- Valeurs profilées centrées réduites des hauteurs de pluie aux stations de Bagatelle et Ligne Paradis	71
<u>FIG. II.9</u>	- Valeurs mensuelles profilées de la pluviométrie aux stations de Bagatelle, Ligne Paradis, Petite France, St-Philippe et Piton Tortue	72
<u>FIG. II.10</u>	- Valeurs profilées centrées réduites des hauteurs de pluies à Petite France et Ligne Paradis	73
<u>FIG. II.11</u>	- Hauteurs moyennes mensuelles de pluie à Bagatelle et Ligne Paradis	74
<u>FIG. II.12</u>	- Valeurs mensuelles de la pluviométrie en mm aux stations de Piton Tortue, St-Philippe, Petite France, Ligne Paradis et Bagatelle	75
<u>FIG. II.13</u>	- Hauteurs moyennes mensuelles de pluie à St-Philippe, Petite France et Piton Tortue	76
<u>FIG. II.14</u>	- Restitution par ACP de la pluviométrie mensuelle à 7 stations de La Réunion	83
<u>FIG. II.15</u>	- Pluviométrie annuelle à La Réunion	85

<u>FIG. III.1</u>	- Température mensuelle 1971-1981 à 7 stations de l'île	128
<u>FIG. III.2</u>	- Relation mensuelle entre la température et l'altitude Période 1971-1981	130
<u>FIG. III.3</u>	- Valeurs mensuelles de température estimées d'après les relations linéaires établies avec l'altitude comparées en 6 stations aux valeurs observées	131
<u>FIG. III.4</u>	- Distribution des valeurs moyennes mensuelles d'insolation à 5 stations de La Réunion	134
<u>FIG. III.5</u>	- Distribution mensuelle de l'insolation aux stations de St-Pierre, Bellecombe, Plaine des Palmistes, Cilaos et Petite France	135
<u>FIG. III.6</u>	- Relation entre l'insolation moyenne interannuelle et l'altitude	137
<u>FIG. III.7</u>	- Insolation mensuelle restituée par application des résultats de l'ACP comparée à l'insolation mesurée	140
<u>FIG. III.8</u>	- Rose des vents aux stations synoptiques de La Réunion	142
<u>FIG. III.9</u>	- Distribution des valeurs mensuelles de différents indices d'évaporation à Gillot	145
<u>FIG. III.10</u>	- Distribution spatiale de l'ETP - Valeurs moyennes interannuelles 1971-1981 en mm	147
<u>FIG. III.11</u>	- Distribution moyenne mensuelle de l'ETP en différentes mailles de l'île - Période 1971-1981	149

*
* *

<u>FIG. IV.1</u>	- Modèle GARDENIA du B.R.G.M. - Schéma de fonctionnement	191
<u>FIG. IV.2</u>	- Localisation des bassins hydrologiques étudiés	193
<u>FIG. IV.3</u>	- Simulation des débits de la rivière Langevin	200
<u>FIG. IV.4</u>	- Simulation des débits de la rivière des Marsouins	200
<u>FIG. IV.5</u>	- Simulation des débits des rivières de la côte Est	201
<u>FIG. IV.6</u>	- Simulation des débits du bras de Cilaos	202
<u>FIG. IV.7</u>	- Simulation des débits de la ravine à Marquet	203
<u>FIG. IV.8</u>	- Simulation des débits de la rivière Langevin en considérant la lame d'eau mesurée à la station de Grand Galet	204
<u>FIG. IV.9</u>	- Valeurs moyennes annuelles des hauteurs de pluies aux mailles constituant les bassins versants étudiés, ainsi qu'aux stations proches	205
<u>FIG. IV.10</u>	- Géologie sommaire du bassin versant amont de la rivière des Marsouins et coupes interprétatives	207
<u>FIG. IV.11</u>	- Simulation des débits de la rivière des Marsouins, en considérant la lame d'eau de la station de Takamaka	209
<u>FIG. IV.12</u>	- Réserves en eau du sol	214

*
* *

<u>FIG. V.1</u>	- Pluie efficace moyenne sur la période 1971-1981 - Valeurs aux 304 mailles	236
<u>FIG. V.2</u>	- Valeurs de l'ETP et de l'ETR moyennes annuelles de la période 1971-1981	237
<u>FIG. V.3</u>	- Distribution mensuelle des valeurs moyennes sur l'ensemble de l'île, de la pluie, de la pluie efficace, l'ETP, et l'ETR	238
<u>FIG. V.4</u>	- Pluie efficace moyenne mensuelle de septembre sur l'île de La Réunion	240
<u>FIG. V.5</u>	- Localisation des 19 mailles retenues	241
<u>FIG. V.6</u>	- Pluie efficace correspondant à l'année décennale humide (période 1971-1981)	244
<u>FIG. V.7</u>	- Pluie efficace correspondant à l'année médiane (période 1971-1981)	245
<u>FIG. V.8</u>	- Pluie efficace correspondant à l'année décennale sèche (période 1971-1981)	247
<u>FIG. V.9</u>	- Pluie efficace moyenne interannuelle en considérant une ETP sur-évaluée de 20 %	249
<u>FIG. V.10</u>	- Différences sur les pluies efficaces moyennes inter-annuelles obtenues en considérant les réserves en eau du sol de capacité 50 et 150 mm	253
<u>FIG. V.11</u>	- Comparaison des pluies efficaces mensuelles obtenues à Dos d'Ane par bilan d'eau à pas de temps journalier et mensuel	259
<u>FIG. V.12</u>	- Approche globale du bilan d'eau - Sélection de petites unités en différentes régions de l'île de La Réunion	264
<u>FIG. V.13</u>	- Comparaison des pluies efficaces obtenues par bilan global au niveau de l'unité, et des moyennes de pluies efficaces des mailles constituant l'unité - Résultats pour les unités 4, 5, 1 et 8	266-267
<u>FIG. V.14</u>	- Relations annuelles entre les pluies et les pluies efficaces des 304 mailles de La Réunion - Valeurs pour les années 1975 (a) et 1977 (b)	269
<u>FIG. V.15</u>	- Ecart entre les valeurs moyennes interannuelles de la pluie efficace calculée par bilan d'eau et de la pluie efficace approchée par la relation linéaire globale avec la pluie	270
<u>FIG. V.16</u>	- Relations entre les pluies et les pluies efficaces aux 304 mailles de La Réunion - Valeurs moyennes des mois de janvier et octobre	272
<u>FIG. V.17</u>	- Relations mensuelles entre les pluies efficaces et les pluies aux mailles 150 et 217	273

<u>FIG. VI.1</u>	- Les composantes de l'écoulement du modèle GARDENIA	297
<u>FIG. VI.2</u>	- Simulation des débits sur la rivière Langevin A : 1 réservoir - B : 2 réservoirs	300
<u>FIG. VI.3</u>	- Carte géologique simplifiée du bassin de la rivière Langevin	300
<u>FIG. VI.4</u>	- Simulation des débits sur la rivière des Marsouins A : 1 réservoir - B : 2 réservoirs	301
<u>FIG. VI.5</u>	- Exemples de simulation très voisines sur la rivière des Roches, avec différentes combinaisons de paramètres	304
<u>FIG. VI.6</u>	- Amélioration de la simulation réalisée sur le Bras de Caverne	305
<u>FIG. VI.7</u>	- Carte géologique simplifiée des bassins de la côte Est et de la zone centrale de l'île	308
<u>FIG. VI.8</u>	- Simulations des débits sur les bassins de la côte Est	309
<u>FIG. VI.9</u>	- Simulations des débits sur le bras de Cilaos	310
<u>FIG. VI.10</u>	- Simulations des débits sur la ravine à Marquet A : 1 réservoir - B : 2 réservoirs	311
<u>FIG. VI.11</u>	- Localisation du bassin versant amont de la ravine à Marquet	320
<u>FIG. VI.12</u>	- Carte géologique du bassin de la ravine à Marquet et coupes interprétatives	322
<u>FIG. VI.13</u>	- Simulations des débits mensuels à Dos d'Ane - Influence de l'échantillon de pluies et du nombre de réservoirs	326
<u>FIG. VI.14</u>	- Débits mensuels simulés de la ravine à Marquet sur la période 1968-1982 en utilisant différents échantillons de lames d'eau	331
<u>FIG. VI.15</u>	- Classement en ordre croissant des débits simulés de la ravine à Marquet	334
<u>FIG. VI.16</u>	- Hauteurs journalières de pluie au poste de Grand Coin, 1981-1982	336
<u>FIG. VI.17</u>	- Débits journaliers de la ravine à Marquet à Dos d'Ane, 1981-1982	336
<u>FIG. VI.18</u>	- Simulations des débits journaliers de la ravine à Marquet par le programme AMANDE	338
<u>FIG. VI.19</u>	- Etude du tarissement de la ravine à Marquet	342
<u>FIG. VI.20</u>	- Evolution comparée de la pluviométrie et piézométrie journalières à Grand Coin - 1982	348
<u>FIG. VI.21</u>	- Simulation de la piézométrie journalière à Dos d'Ane A - Paramètres optimisés sur les débits B - Paramètres optimisés sur les niveaux	352

LISTE DES ANNEXES

	pages
<u>ANNEXE I.1</u> - Postes pluviométriques gérés par le Service Météorologique de La Réunion	49
* * *	
<u>ANNEXE II.1</u> - Estimation des valeurs manquantes à partir des régressions multiples	93
<u>ANNEXE II.2</u> - Evolution de la pluviométrie le long du profil St-Benoît - St-Pierre	97
<u>ANNEXE II.3</u> - Relation entre la hauteur de pluie mensuelle et l'altitude à La Réunion	101
<u>ANNEXE II.4</u> - Analyse en composantes principales réalisée sur les hauteurs de pluies mensuelles	106
<u>ANNEXE II.5</u> - Extension des données	109
* * *	
<u>ANNEXE III.1</u> - Température	161
<u>ANNEXE III.2</u> - Insolation	169
<u>ANNEXE III.3</u> - Vents, Evaporation "Piche" et Humidité relative	179
<u>ANNEXE III.4</u> - Evapotranspiration potentielle	183
* * *	
<u>ANNEXE IV.1</u> - Le modèle GARDENIA	223
<u>ANNEXE IV.2</u> - Situation géographique des stations équipées de limnigraphes et caractéristiques physiques des bassins versants correspondants	231
* * *	

ANNEXE V.1 - Bilan d'eau au sol selon la méthode de Thornthwaite 281

ANNEXE V.2 - Influence du pas de temps du bilan sur les valeurs mensuelles de pluies efficaces 283

ANNEXE V.3 - Régressions linéaires entre les pluies et les pluies efficaces 289

*
* *

ANNEXE VI.1 - Le Modèle AMANDE 361

ANNEXE VI.2 - Extension dans le temps de la chronique des lames d'eau mensuelles sur le bassin de la ravine à Marquet 367

ANNEXE VI.3 - Etude de quelques crues de la ravine à Marquet 371

*
* *

INTRODUCTION

L'île de LA REUNION, malgré un climat tropical humide se manifestant par d'abondantes précipitations, présente d'importants problèmes de ressources en eau:

- La desserte en eau potable de la population a commencé en 1957. Elle n'est pas assurée de manière régulière dans toute l'île. Il y a une dizaine d'années, plus de la moitié des logements ne disposait pas d'adduction d'eau à l'intérieur du logement, ni même dans la cour. Ces problèmes subsistent encore, notamment dans le secteur sous le vent de l'île. Ces besoins sont appelés à se développer avec l'évolution de la société réunionnaise et son urbanisation : en 1971, la consommation à St-Denis (17 000 logements) était estimée à 240 l par jour et par habitant contre 76 seulement à St-Benoît (4 000 logements) [1].
- La mise en valeur agricole par irrigation (côte sous le vent) et la production d'hydroélectricité (côte au vent) constituent actuellement les deux autres pôles importants de la recherche et de la gestion de l'eau.
- Le développement de la géothermie et des activités industrielles constituent à moyen terme de nouvelles sources de besoin.

Les sources et les eaux de surface sont restées jusqu'aux années 1970 les seuls flux captés. Mais cette ressource n'est pas répartie de façon homogène sur l'île. Les ravines du secteur sous le vent de l'île ne connaissent un ruissellement de surface qu'à l'occasion d'épisodes pluvieux importants (quelques jours par année).

Le développement des forages, au cours des dix dernières années notamment, dénote l'intérêt croissant envers l'eau souterraine. Si la majorité des ouvrages ainsi réalisés près du littoral répondent aux es-

pérances, l'hydrogéologie demeure assez mal connue à LA REUNION :

- Où, comment circule l'eau souterraine dans le contexte géologique particulier de LA REUNION ?
- Quelle est la quantité d'eau qui transite ainsi dans le sol et le sous-sol de l'île ?

Nous avons cherché à donner les premiers éléments de réponses concernant cette deuxième question en étudiant la variabilité spatiale et temporelle des différents termes du bilan hydrologique mesurés à LA REUNION.

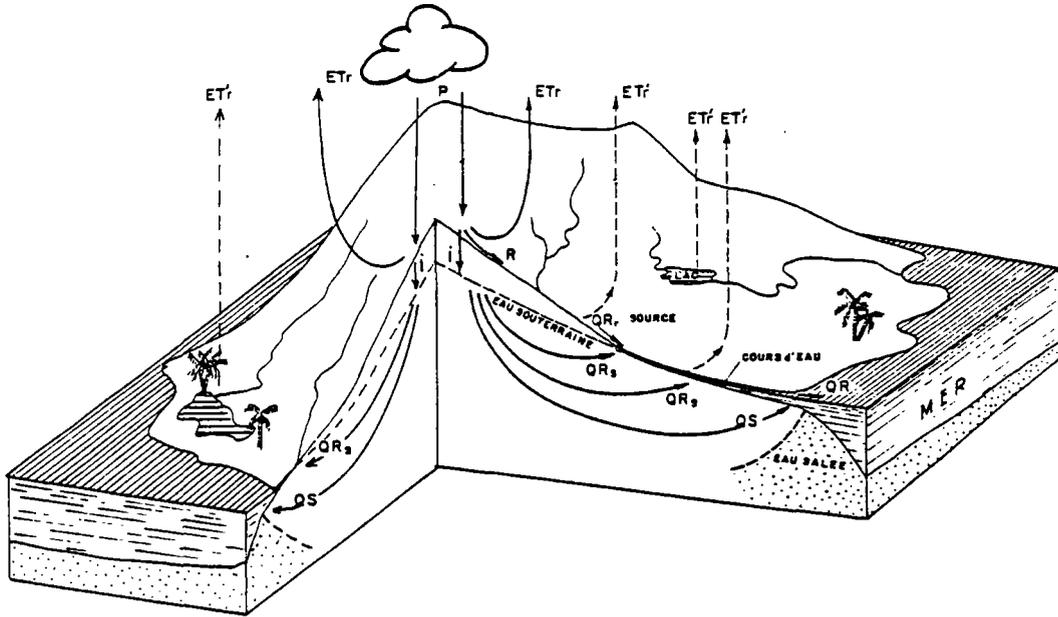
Sur une unité hydrologique isolée spatialement (cas d'une île) et pendant une période donnée, l'équilibre entre les apports et les pertes en eau peut se résumer au bilan hydrologique (fig. I.1) :

$$P = ETR + R + I + \Delta S$$

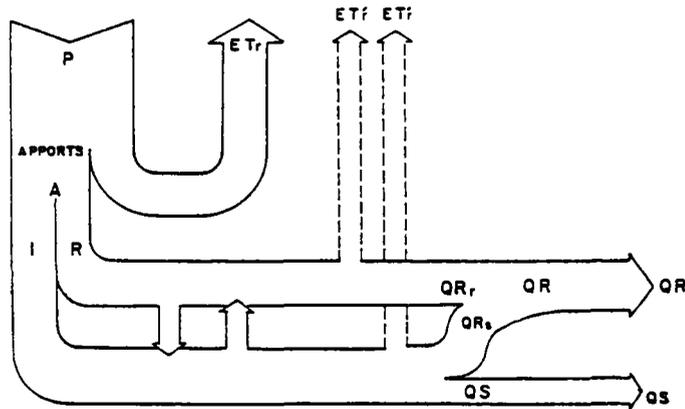
où P précipitations
 E évapotranspiration réelle
 R ruissellement de surface
 I infiltration
 ΔS variation des réserves en eau souterraine

Une partie de l'eau d'infiltration I réapparaît dans le réseau hydrographique après avoir circulé dans le sol ou le sous-sol, à la faveur des sources et résurgences. A l'opposé, l'eau qui s'écoule dans la partie amont d'une rivière peut s'infiltrer dans les alluvions à l'aval et échappe ainsi à la mesure éventuelle du ruissellement, ce sont les inféro flux indiqués par RIVALS [19].

La distinction entre les composantes superficielles (QR_R) et souterraines (QR_S) de l'écoulement de surface est ainsi parfois assez floue. De plus, on ne contrôle pas la proportion de l'eau souterraine qui transite directement vers la mer (fig. I.1) (sous-écoulement souterrain : QS).



- | | | | |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------|---------------------------------|
| P | : précipitations | QR | : écoulement de surface sortant |
| I | : infiltrations | QR _r | composantes superficielles |
| R | : ruissellement | QR _s | et souterraines de QR |
| ET _r | : évapotranspiration réelle | QS | : sous-écoulement sortant |
| ET _r ' | : soustraction par évaporation | | |
| | d'une part de l'écoulement constitué | | |



$$P = ETr + ETr' + QR + QS$$

$$\text{Apports} = I + R = \text{Précipitations efficaces} \\ = \text{Potential d'écoulement interne}$$

FIG. I.1 - Bilan hydrologique d'une unité spatiale isolée (île)
(inspiré de ERHARD-CASSEGRAIN et MARGAT [14])

Ainsi, nous avons, dans une première phase, cherché à évaluer l'écoulement total ou pluie efficace*, soit en raisonnant par rapport à la surface du sol, la différence entre les apports d'eau par la pluie et les pertes par évapotranspiration.

En négligeant les variations des réserves en eau souterraine, on obtient les égalités :

$$\begin{aligned}
 P \text{ efficace} &= R + I \\
 &= P - ETR \\
 &= Q && \text{écoulement total} \\
 &= QR + QS && \text{écoulement de surface} + \text{sous-écoulements sortants}
 \end{aligned}$$

Le découpage du département de La Réunion en maille de 3 km de côté permet une approche globale et homogène de ces paramètres -pluie et évapotranspiration- sur l'ensemble de l'île. L'évaluation rigoureuse des précipitations efficaces repose sur une bonne compréhension préalable des phénomènes climatiques.

De par sa situation dans l'Océan Indien, l'île de La Réunion bénéficie d'un contexte climatique original avec notamment une extrême variabilité spatiale et temporelle de la pluie. Afin de mieux comprendre la répartition dans l'espace, que les paramètres physiques (altitude, exposition aux vents dominants...) ne suffisent à expliquer, nous avons recours à une étude des similarités de comportement entre les différents postes pluviométriques basées sur une analyse en composantes principales ; cette étude sert ensuite de guide à l'extension des données.

* Nous reprenons ici le terme défini par A. ERHARD-CASSEGRAIN et J. MARGAT [14], dans : "Introduction à l'économie générale de l'eau" : "les précipitations efficaces ont la signification de potentiels d'écoulement (immédiat ou différé) locaux comprenant à la fois les apports d'eau de ruissellement et ceux par infiltration qui alimentent les nappes souterraines". Les précipitations efficaces sont également considérées par ces auteurs comme apports nets ou ressources renouvelables en eau naturelle.

Tenant compte des données disponibles, l'approche de l'évapotranspiration est faite à partir de formules climatiques. Si la comparaison des résultats de diverses méthodes permet de s'assurer d'une relative fiabilité, la confrontation de cet index d'évapotranspiration, des données pluviométrique et de la réserve en eau du sol (toujours délicate à définir a priori) laisse planer quelques incertitudes sur les ressources renouvelables en eau ainsi définies.

L'extension récente du réseau hydrométrique est toujours réduite et la proportion d'écoulement souterrain se déversant directement à la mer excluent toute approche satisfaisante du bilan d'eau au niveau de l'île. Les données moyennes annuelles du volume écoulé des différentes rivières de La Réunion approchées par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.) [26] au début des années soixante permettent simplement de définir l'ordre de grandeur des différents termes du bilan.

Cependant à partir des quelques bassins versants jaugés, l'utilisation de modèles globaux à réservoirs, schématisant la relation pluie-débit des bassins étudiés, permet, par le calage d'une série de débits ainsi reconstitués sur la série des débits observés :

- de vérifier ponctuellement les données d'entrée (pluie et évapotranspiration) à chaque pas de temps,
- de quantifier la réserve en eau du sol (paramètre optimisable par le modèle),
- d'expliquer le fonctionnement hydrologique des rivières observées, d'identifier la prépondérance de tel ou tel type d'écoulement et de comparer ainsi les différents bassins versants en fonction de leur contexte géologique et physique,
- de déterminer localement les flux d'eau souterraine qui transite vers les nappes en aval-écoulement.

La vérification de l'évaluation de la ressource en eau au niveau des bassins versants étudiés (illustrant la plupart des contextes physiques originaux de l'île) donne ainsi plus de crédits à l'étude globale réalisée.

La confrontation mensuelle des séries observées et calculées est, surtout dans le cadre de La Réunion, plus satisfaisante que le simple équilibre annuel du bilan d'eau communément réalisé. La qualité de l'ajustement est le meilleur indice de fiabilité des résultats et ceci d'autant plus que la chronique étudiée est étendue et variable (succession d'années "sèches" et "humides").

Le fichier des valeurs mensuelles de pluies efficaces aux différentes mailles permet l'étude de la variabilité spatiale et temporelle de la ressource en eau au niveau de l'île et de définir des zones d'extension variable en fonction de la période de retour, où cette ressource est très faible à nulle.

L'exemple du bassin versant du Dos d'Ane permet d'étudier la fiabilité de l'approche mensuelle, dans les conditions climatiques de La Réunion (épisodes pluvieux d'ordre journalier, voire horaire). Nous comparons ces résultats à ceux d'une approche journalière réalisée avec un modèle un peu plus complexe. Ce petit bassin nous permet également d'étudier la relation entre la ravine à Marquet et la nappe.

1re PARTIE

PRESENTATION GENERALE DE L'ILE DE LA REUNION
ET DE LA METHODE D'APPROCHE GLOBALE DE LA RESSOURCE EN EAU

1. TRAITS GENERAUX

1.1. Présentation rapide

"Petit bout de France" depuis 1649, l'île Bourbon devenue par la suite LA REUNION est un des départements d'Outre-Mer français à 12 000 km de la Métropole.

Par 21° de latitude Sud et 55°30 de longitude Est, l'île de La Réunion paraît un peu isolée dans l'Océan Indien. Pourtant l'île Maurice n'est qu'à 180 km et Madagascar à quelques 700 km (fig. I.2).

Avec 2511 km² de superficie pour 208 km de périmètre, l'île présente une forme grossièrement elliptique avec un grand axe NO-SE de 70 km et un petit axe NE-SO de 50 km.

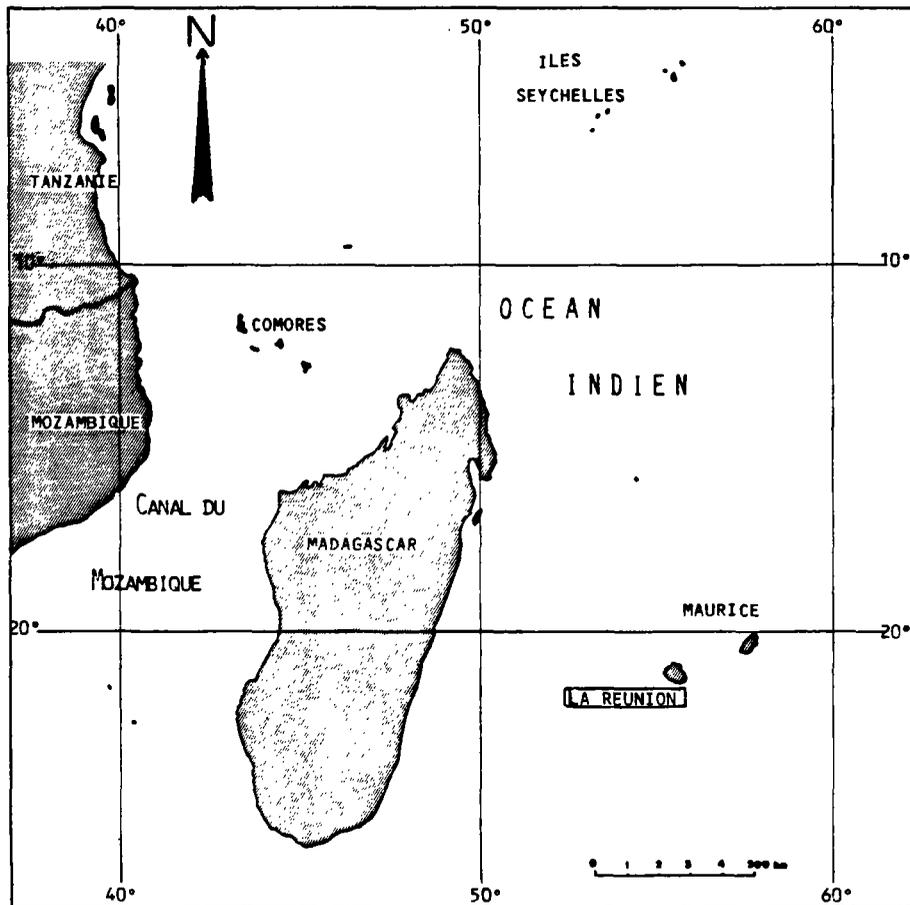


FIG. I.2 - Situation de l'île de La Réunion

L'origine volcanique se manifeste tant dans cet isolement et cette forme que dans l'allure générale de l'île (fig. I.3). La Réunion se présente sous la forme de deux cônes volcaniques joints en leur piémont. La ligne de crête qui correspond en fait au grand axe, joint le Piton des Neiges, sommet de l'île (3069 m), au Piton de la Fournaise (2631 m). Les flancs de ces deux volcans sont essentiellement constitués par un empilement de coulées basaltiques. Les pentes externes de ces cônes sont assez régulières, 6 à 8° environ, maximales dans la zone moyenne. Elles s'adoucissent cependant dans la frange littorale pour arriver tangentiellement à la mer ; il existe cependant certains secteurs en falaise.

Le littoral présente un tracé régulier, sans aucun site de port naturel ; la mer devient très rapidement profonde et les formations récifales sont très localisées (zone de St-Gilles). Les seules plaines véritables sont issues des formations alluviales à l'exutoire des cirques du Piton des Neiges.

La situation géographique de l'île juste au Nord du Tropique du Capricorne explique le climat tropical humide de l'île, tempéré par l'altitude et caractérisé par une opposition très nette entre la côte au vent soumise aux alizés du Sud-Est, et la côte sous le vent, protégée de ceux-ci par les deux massifs volcaniques (fig. I.3).

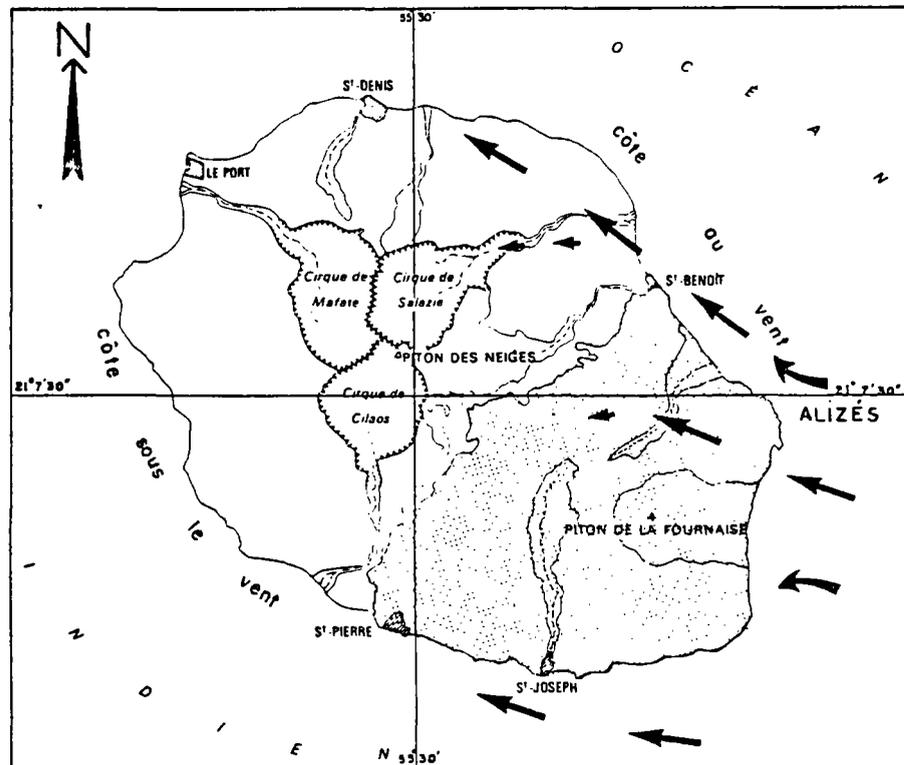


FIG. I.3 - Répartition des affleurements des deux édifices volcaniques et des vents dominants à La Réunion

La monotonie d'ensemble des pentes externes masque l'extrême diversité de l'intérieur de l'île. Sous la double influence de la tectonique et des facteurs climatiques, l'érosion joue un rôle considérable dans l'évolution des reliefs. Les trois cirques de Salazie, Mafate et Cilaos entourant le Piton des Neiges en sont la manifestation la plus grandiose, mais toutes les rivières de l'île ont creusé d'impressionnantes gorges. Entre crêtes déchiquetées et ravines encaissées, subsistent de petits secteurs subhorizontaux isolés : les "ilets".

Le réseau hydrographique est très dense, notamment sur les pentes externes des deux volcans (1 ravine tous les 300 m en moyenne). Guidées par les génératrices des cônes volcaniques, ces ravines divergent et présentent des bassins versants très réduits. Aussi les cours d'eaux perennes se concentrent surtout dans la zone "au vent" de l'île, la plus arrosée sous l'influence directe des alizés du Sud-Est. Si sur la quinzaine de rivières présentant un écoulement permanent, six d'entre elles aboutissent sur la côte "sous le vent" ; en fait, seule la ravine Saint-Gilles présente un bassin versant exclusivement de la côte Ouest ; toutes les autres émanent de la zone centrale de l'île.

L'évolution pédologique et la végétation sont fortement influencées par le climat, le relief et l'âge des formations volcaniques. L'altitude reste le facteur expliquant le mieux leur répartition.

1.2. Géologie*

Les volcans boucliers de l'île de La Réunion reposent par 4000 m de fond sur le plancher océanique à l'extrémité sud du plateau des Mascareignes. L'île est ainsi formée exclusivement de formations d'origine volcanique (en place ou remaniés par l'érosion).

* Remarques. Nous nous contentons d'aborder succinctement les grands traits de la lithostratigraphie des différentes formations de l'île et de son évolution structurale dans l'optique de l'étude du comportement hydraulique de ces formations et des mécanismes régissant le transfert des eaux souterraines

Les plus anciennes formations datées remontent à 2.1 millions d'années ; elles sont issues du Piton des Neiges. Le Piton de la Fournaise, toujours actif, est apparu plus récemment (360 000 ans) sur le flanc Sud-Est du premier volcan (fig. I.3 à I.5).

BILLARD [3] distingue 4 grandes phases dans l'activité du Piton des Neiges (fig. I.4) ; elles sont séparées par des périodes de calme dominées par les phénomènes d'érosion et d'altération :

- La phase I antérieure à 2,1 millions d'années est constituée de brèches et d'agglomérats totalement zéolitisés. Ces formations n'affleurent que très localement, notamment dans le fond des cirques.
- La phase II constitue l'essentiel des reliefs, même si elle a été très largement recouverte par les phases ultérieures. Elle se caractérise par un empilement de coulées et de bancs de scories (basalte, basalte à olivine et océanite) zéolitisés à la base ; à partir de 430 000 ans succède une période de calme d'environ 80 000 ans permettant le développement de phénomènes d'érosion et d'altération.
- La phase III correspond à la différenciation de laves (série alcaline) ; le faciès à phénocristaux de feldspath étant le plus caractéristique. Des formations pyroclastiques apparaissent à la fin de cette phase. L'injection de dykes et sills apparue lors des phases précédentes, se poursuit mais le basalte y est le plus souvent emplacé par des trachytes, syénites et gabbros (cirques de Salazie et Cilaos).
- Si durant les premières phases, l'activité est essentiellement concentrée au niveau du sommet actuel du Piton des Neiges, les points d'émission se diversifient au cours de la phase IV avec d'importantes manifestations explosives (tufs de St-Gilles): Les dernières coulées remonteraient à 20 000 ans environ, l'activité actuelle se limite aux sources hydrothermales.

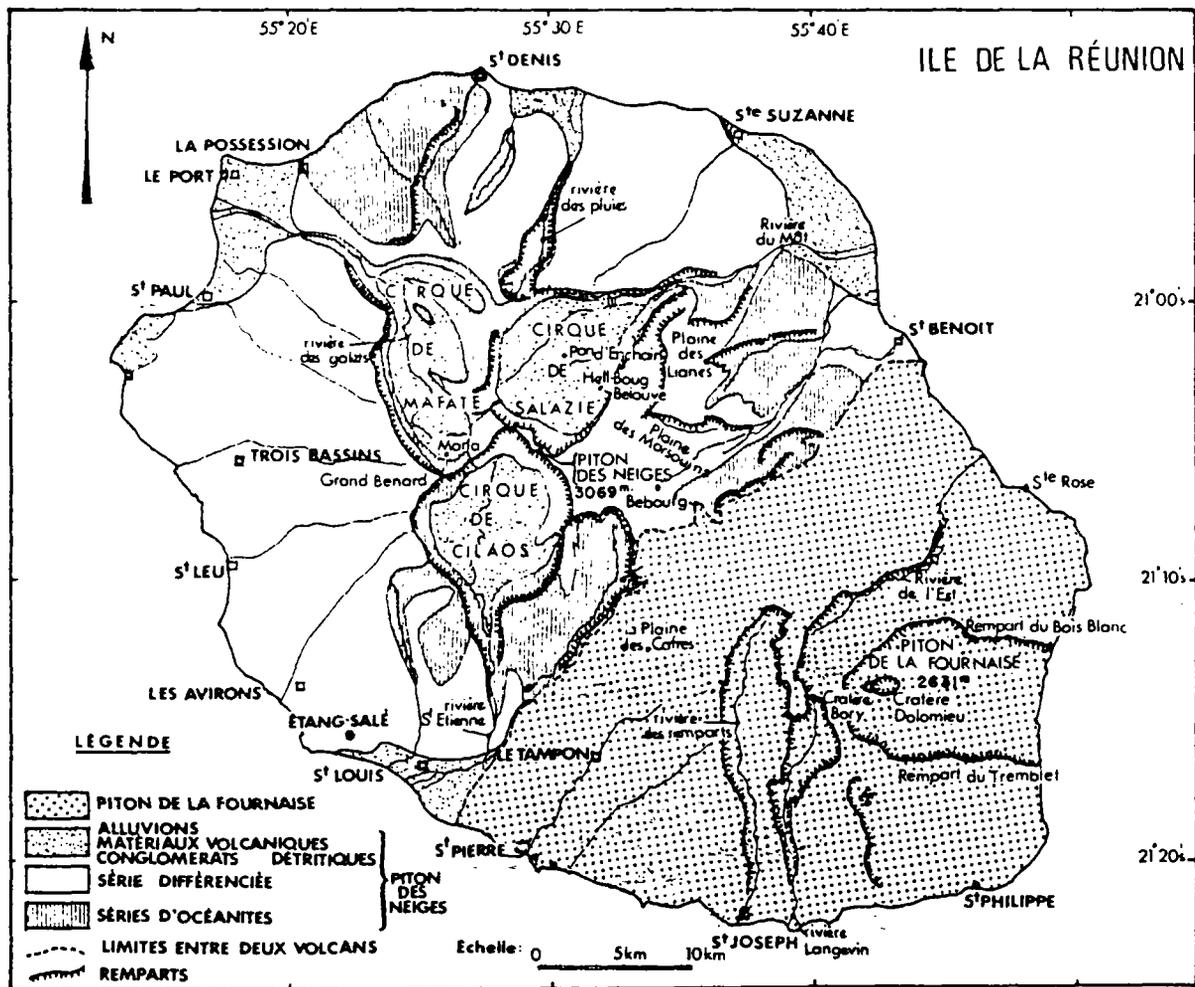


FIG I.4 a - Carte géologique simplifié de La Réunion
(d'après MAC DOUGALL, 1971)

Le Massif de la Fournaise a dû apparaître au cours de la phase III du Piton des Neiges, à partir d'un réservoir magmatique différent. Les laves émises jusqu'à maintenant sont identiques à celles des premières phases du Piton des Neiges. On y individualise également plusieurs phases (cinq) entrecoupées de périodes de calme pendant lesquelles l'altération pédologique est active (fig. I.5).

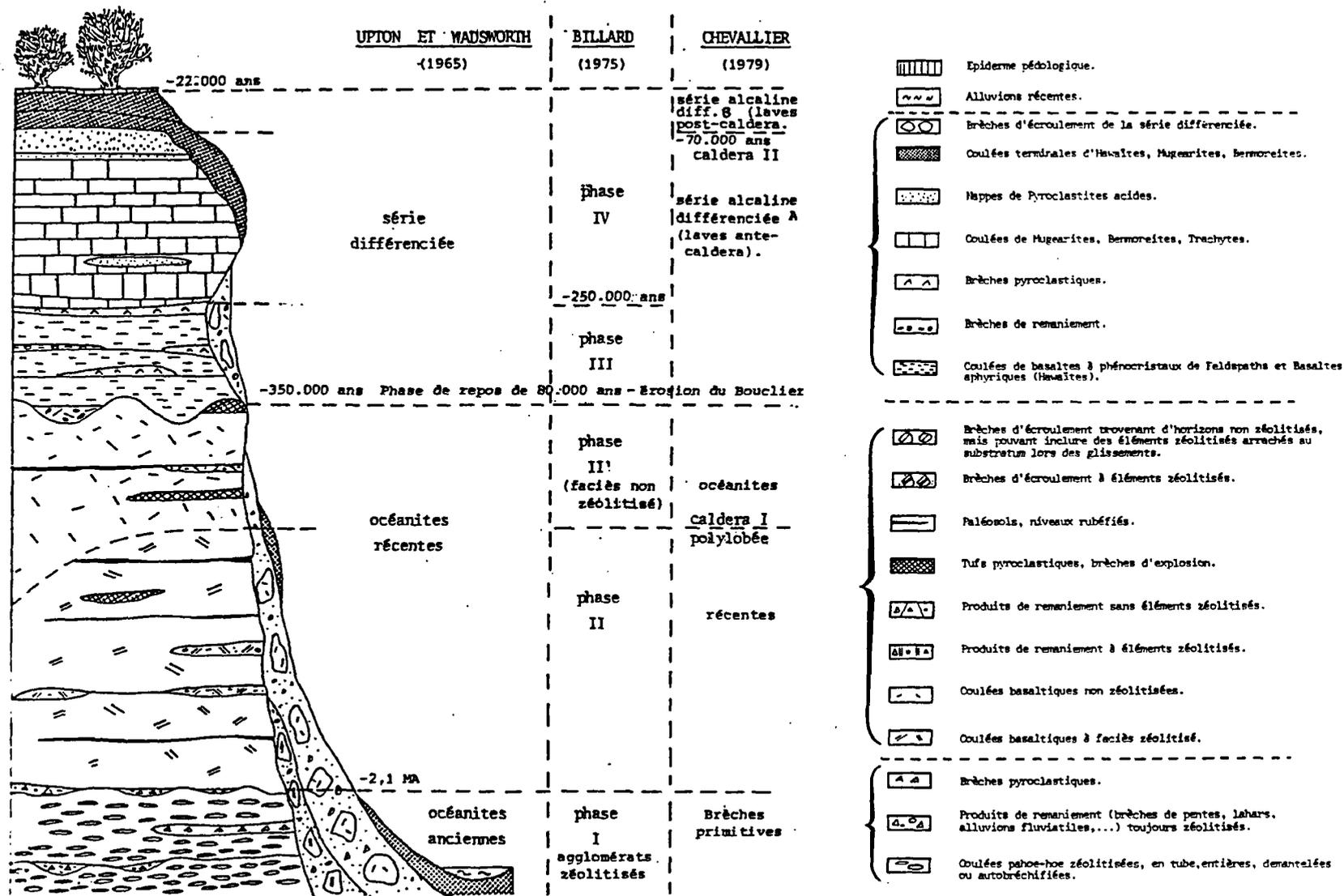


FIG. I.4 b - Colonne lithostratigraphique schématique des formations volcaniques du Massif du Piton des Neiges (d'après RANCON [18])

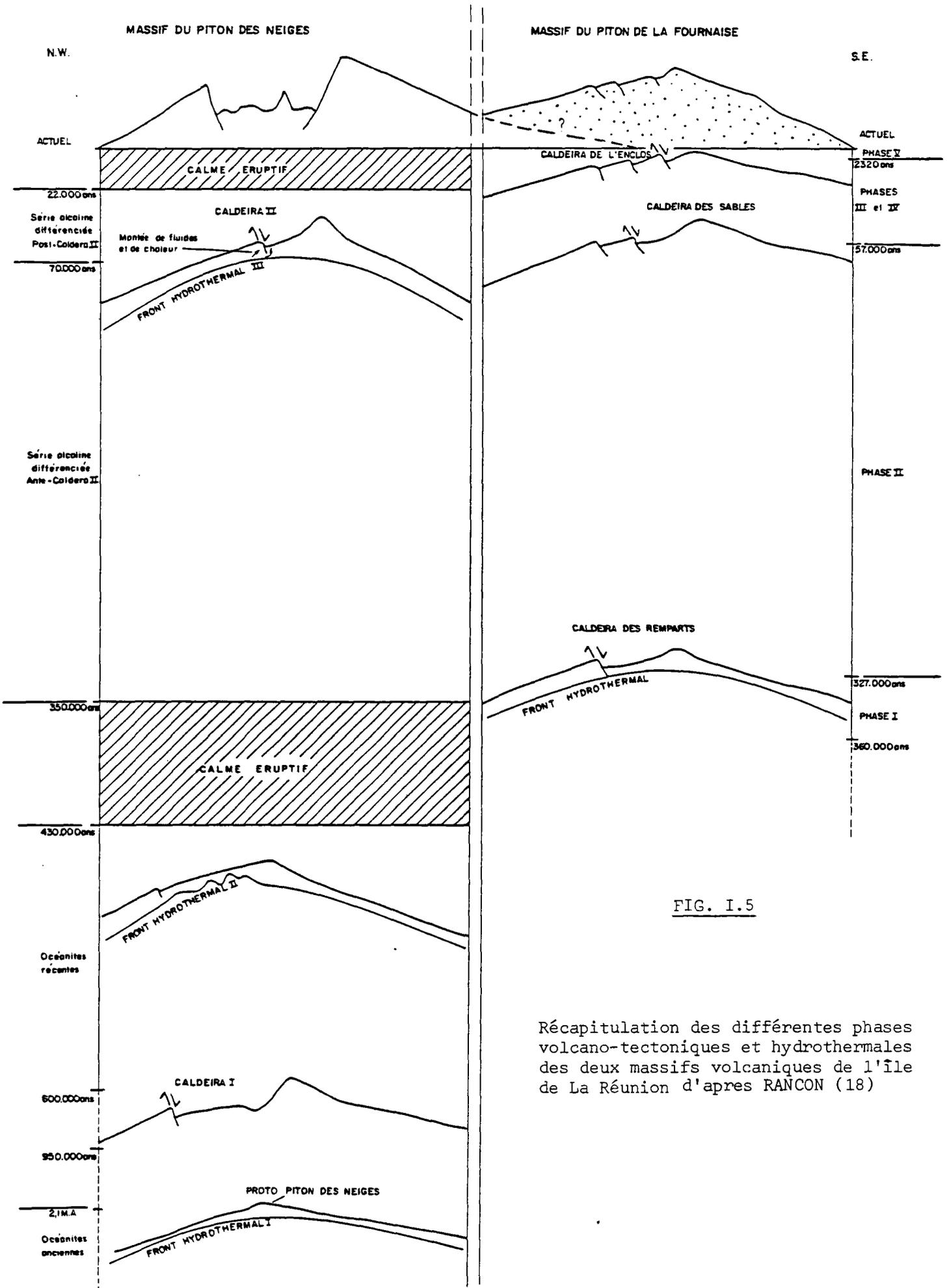


FIG. 1.5

Récapitulation des différentes phases volcano-tectoniques et hydrothermales des deux massifs volcaniques de l'île de La Réunion d'après RANCON (18)

La formation de petits cônes volcaniques sur les flancs du Piton des Neiges (Plaine des Cafres) est contemporaine, surtout des phases III et IV du Piton de la Fournaise.

Trois caldeiras successives séparent les principales phases d'activités, elles sont caractérisées par un déplacement vers l'Est. Les rivières des Remparts et de l'Est, la plaine des Sables et l'enclos Fouqué sont les témoins de ces structures d'effondrements.

CHEVALLIER [8] a mis également en évidence deux caldeiras successives au niveau du Piton des Neiges ; la tectonique cassante est à l'origine du creusement des cirques (fig. I.3) par l'érosion, mais les témoins principaux de ces structures d'effondrements sont limités aux cirques de Cilaos et Salazie.

Les sills et dykes témoignent d'une fracturation intense (surtout au niveau des cirques) des différentes formations volcaniques.

1.3. Hydrogéologie

La simplicité d'ensemble des volcans de La Réunion (deux cônes volcaniques constitués en majorité de coulées basaltiques) masque en fait une très forte hétérogénéité dans le détail :

- empilement de bancs décimétriques à décamétriques de formations allant des coulées très compactes aux scories et formations détritiques (hétérogénéité verticale),
- discontinuité spatiale de ces formations qui, le plus souvent, n'ont qu'une extension limitée (coulées drainées par les paléo-reliefs) (hétérogénéité horizontale),
- discontinuité dans le temps : les principales phases d'activité sont séparées par des périodes de calme (80 000 ans entre les phases II et III du Piton des Neiges) pendant lesquelles se développent les phénomènes d'érosion et d'altération :
 - . les rivières creusées en fin de phase II ont canalisé la plupart des premières coulées de la phase III, et aujourd'hui encore ces paléo-reliefs peuvent être des drains préférentiels à l'écoulement des eaux souterraines ;

. l'altération pédologique sous un climat tropical chaud et humide est très intense : vers St-Louis un forage a traversé 7 m de formations altérées pour 25 m de formations saines datant de la phase IV. En surface, la décomposition des coulées et scories conduit à la formation d'argile rouge. Les paléosols constituent ainsi des horizons imperméables. Leur extension demeure cependant le plus souvent sectorielle.

- La tectonique cassante et l'injection des sills et dykes compliquent ce schéma en décallant les formations, créant des barrages ou au contraire des drains supplémentaires : un banc de basalte compact très sain peut jouer le rôle d'imperméable ; le même intensément fracturé sera au contraire très perméable (si fissures non colmatées).

La limite de la zéolitisation des premières phases du Piton des Neiges correspond à un niveau imperméable, notamment très visible dans les cirques. C'est le seul niveau imperméable généralisé reconnu dans l'île, car l'hétérogénéité des formations, la présence de formations altérées et paléosols, l'injection des sills découpent le sous-sol de La Réunion en une multitude de couples "aquifère-imperméable", le plus souvent de faible puissance et d'extension limitée, s'alimentant gravitairement en cascade à la faveur de fractures, dykes (fig. I.6).

Le pendage globalement rayonnant des formations volcaniques tend à entraîner la majorité des eaux infiltrées vers la périphérie de l'île, où elles rejoignent les nappes côtières généralement rassemblées sous le terme de "nappe de base".

Le calage d'un modèle analogique sur la plaine des galets, aquifère multicouche, à la sortie du cirque de Mafate aboutit à considérer un apport latéral par les formations géologiques à l'amont de cet aquifère correspondant à un débit moyen de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$. L'alimentation par la rivière des Galets représente un débit de 380 l/s .

Les nappes alluviales dans le secteur aval des grandes rivières sont évidemment alimentées principalement par leurs rivières respectives. L'accumulation d'alluvions peut ainsi être considérable (170 m en bordure de mer dans la plaine des Galets). Dans ce matériel détritique,

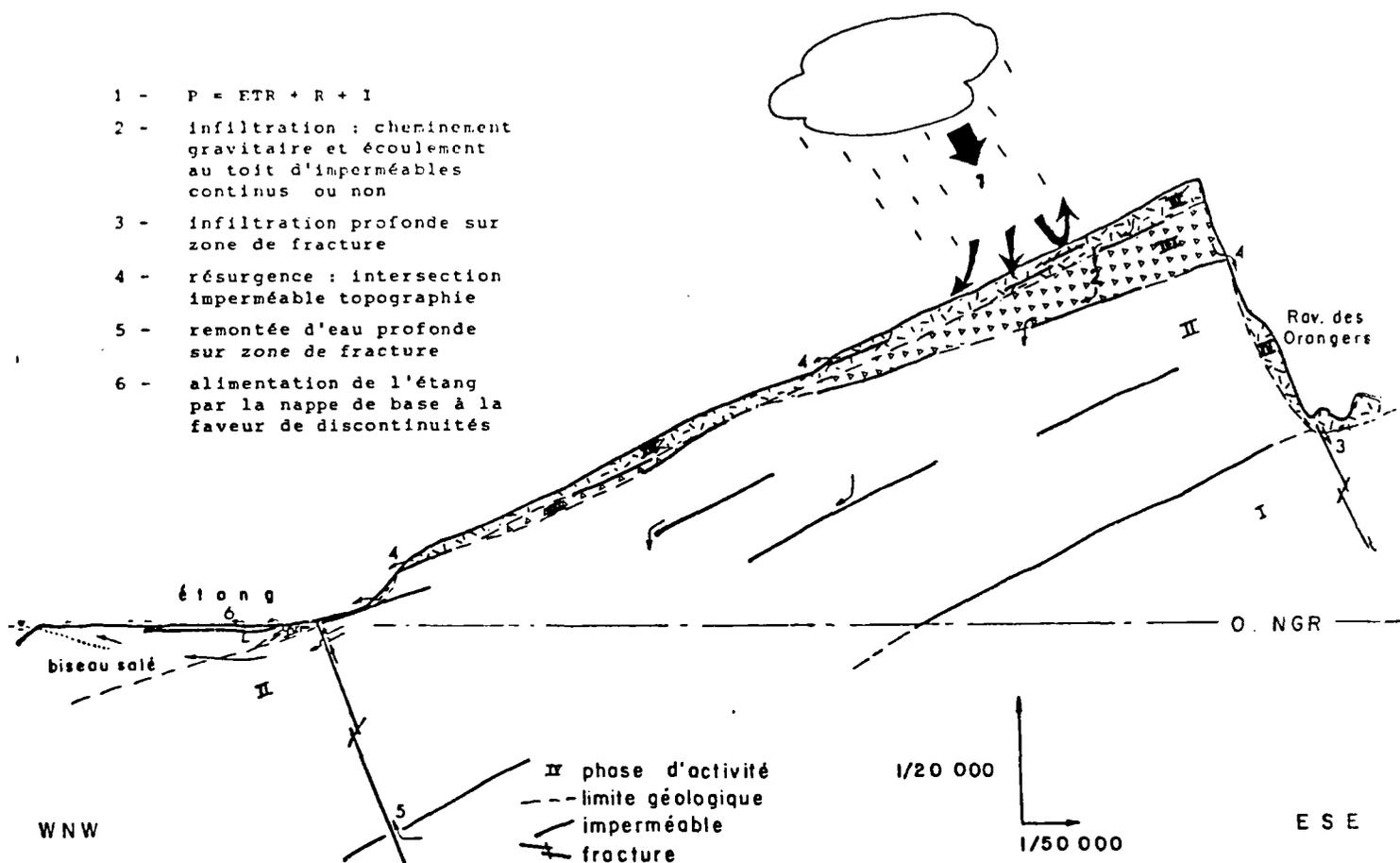


FIG. I.6 - Esquisse d'un schéma hydraulique global des pentes externes du Piton des Neiges - Profil établi entre l'étang St-Paul et le cirque de Mafate, par M. STEENHOUDT

le plus souvent très poreux et perméable, la majeure partie des eaux de ruissellement s'infiltrent et il ne subsiste qu'un mince filet d'eau en surface parfois plus rien. Toute l'eau s'écoule au sein des alluvions ; un des exemples le plus frappant apparaît dans la rivière des Remparts. A l'aval du Bras de Mahavel, suite à un éboulement spectaculaire en 1965, des millions de mètres cubes de matériaux ont bouché totalement la vallée de la rivière des Remparts, et sont progressivement charriés vers l'aval

à chaque crue. Toute l'eau de la rivière des Remaprts, puis celles des différents affluents, se perd dans les alluvions pour ne réapparaître qu'au niveau de St-Joseph (émergence de la nappe). Le débit d'étiage de la rivière des Remparts avait été estimé proche de 1 m³/s lors des études de l'O.R.S.T.O.M. [15] antérieures à l'éboulement de Mahavel.

1.3.1. Exploitation des eaux souterraines à La Réunion

Ph. ROUSSET [21] a recensé 24 ouvrages utilisés (ou en cours d'équipement) pour l'alimentation en eau potable. Ils sont tous (à l'exception du forage de la plaine des Grègues) situés sur le littoral et captent les aquifères liés aux formations basaltiques (génériquement rassemblés sous le terme "nappe de base") et ceux liés aux formations alluviales. Ces ouvrages sont le plus souvent très productifs (débit moyen d'exploitation supérieur à 100 m³/h). Le puits de la Z.E.C. du Chaudron à St-Denis est prévu pour fournir 1500 m³/h.

Les forages réalisés dans les hauts de l'île n'interceptent que de petits aquifères superficiels susceptibles de fournir des débits de l'ordre de quelques m³/h (plaine des Grègues, plaine de l'Entre-Deux, Dos d'Ane) où la nappe d'extension régionale rencontrée est à une profondeur telle que son exploitation n'est pas envisagée actuellement (forage du Cilaos).

Suite à l'étude de différents sites réalisée dans le cadre des programmes départementaux des ressources en eau pour l'aménagement des hauts de La Réunion, M. STEENHOUDT [22] arrive aux conclusions suivantes :

- les nappes superficielles, en général de faible extension et liées à une altération argileuse locale, ne peuvent couvrir les besoins que d'un habitat dispersé ; elles peuvent être facilement identifiées par les méthodes de prospection géophysique électrique ;
- les nappes profondes : si leur ressource est théoriquement suffisante pour couvrir l'ensemble des besoins des "hauts", leur mobilisation reste aléatoire ou de coût prohibitif ; par contre, l'amélioration des captages des émergences naturelles de ces nappes (source des Hirondelles en amont de Grand-Bassin, bassins de la ravine St-Gilles) est à même de satisfaire la plupart des besoins actuels.

Suite à ces contraintes liées à l'utilisation des eaux souterraines dans les "hauts", le développement à moyen et long terme de ces régions de l'île nécessite d'envisager :

- l'utilisation des eaux superficielles locales par l'intermédiaire de retenues collinaires,
- le recours aux eaux souterraines de la zone littorale.

1.3.2. Paramètres hydrodynamiques

E. CUSTODIO [9] compare les différentes valeurs des paramètres hydrodynamiques mesurées sur diverses formations volcaniques du globe terrestre :

- Porosité totale. Elle peut être inférieure au 1 % pour les coulées basaltiques massives, mais la plupart des formations (basalte en général, scories, formations pyroclastiques) ont des porosités totales, comprises entre 15 et 30 %, les scories récentes pouvant avoir des porosités allant jusqu'à 80 %. A l'extrême variabilité de cette porosité en fonction des formations, il faut ajouter la variabilité au sein d'une même formation (porosité allant de 20 à 70 % sur des ignimbrites, de 80 m d'épaisseur).
- Porosité efficace. Elle est moins mesurée, et varie le plus souvent entre 1 et 10 %.
- Débit spécifique. Inférieur à 1 l/s/m dans les basaltes anciens, cinérites et ignimbrites, ils sont plus importants dans les zones de dykes et dépassent 10 l/s/m dans les basaltes jeunes et les scories.
- Transmissivités. Elles sont également très variables ; de 10^{-8} m²/s dans certaines coulées d'ignimbrites, les transmissivités sont fréquemment de l'ordre de 10^{-3} m²/s dans les formations détritiques, les brèches et les basaltes en zones de dykes. Elles peuvent atteindre le m²/s dans les grandes accumulations de basaltes récents (Snake River, U.S.A. - Oaku, Hawaï).
- Perméabilité. Les basaltes très massifs ont des perméabilités de l'ordre de 10^{-11} m/s, les formations intrusives (dykes, sill...) d'environ 10^{-8} , la plupart des basaltes et autres formations volcaniques (andési-

tes, fonolites, ignimbrites fissurées, brèches) de 10^{-5} à 10^{-6} . La perméabilité des basaltes récents, surtout les formations comprenant des niveaux scoriacés, peuvent dépasser 10^{-3} m/s..

A La Réunion, les essais de pompages sont essentiellement concentrés dans la zone littorale, notamment l'aquifère multicouche de la plaine des Galets [23] :

- les nappes supérieures et moyennes (formations alluviales) ont des transmissivités le plus souvent de l'ordre de 10^{-3} m²/s ;
- la nappe inférieure, en continuité avec la nappe des basaltes ("nappe de base") a une transmissivité qui augmente du Sud au Nord : $2.4 \cdot 10^{-3}$ à $1.2 \cdot 10^{-3}$ m²/s.

Le forage récent réalisé à St-Gilles [22] aboutit à une valeur comparable de transmissivité de la nappe des basaltes : 10^{-1} m²/s.

Les petites nappes superficielles des Hauts de l'île (matériel détritique) testées dans les forages de la plaine des Grègues, la plaine de L'Entre-Deux, Cilaos et Dos d'Ane, ont des transmissivités plus faibles : 10^{-4} à 10^{-3} m²/s.

Le coefficient d'emmagasinement a été approché à partir de la diffusivité calculée dans les zones littorales par la méthode de Berkaloïff (répercussion sur la piézométrie de l'onde des marées). Les valeurs concernant la zone du port et de St-Gilles sont dans la fourchette : 10^{-3} à 10^{-4} (0.1 à 0.01 %).

Dans les formations détritiques au niveau de Cilaos (nappe superficielle), le coefficient d'emmagasinement est au contraire très élevé : 25 %.

En comparant ces valeurs observées à La Réunion à celles des autres formations basaltiques collectées par CUSTODIO, on note que les transmissivités de La Réunion sont proches des cas les plus favorables observés, mais qu'au contraire la porosité efficace apparaît très faible (excepté dans les formations détritiques).

1.3.3. Conclusion

Les formations volcaniques de La Réunion apparaissent comme relativement perméables. Les cirques de la zone centrale de l'île et les canyons creusés par les différentes ravines attestent de la perméabilité en grand de ces formations, mais incapables de contenir d'importantes réserves en eau (rôle transmissif et peu capacitif de ces formations).

La Réunion présente des similitudes avec les autres îles volcaniques : on y définit trois zones hydrogéologiques en fonction de l'altitude :

- zone d'altitude caractérisée par une infiltration importante (basaltes récents et niveaux scorisés),
- zone intermédiaire avec une infiltration moyenne (développement des sols, altération argileuse) et d'apparition de couples aquifères--imperméables le plus souvent de faible épaisseur et d'extension réduite,
- zone côtière avec une eau souterraine abondante en équilibre dynamique avec les eaux marines.

Le comportement hydraulique des différentes formations a été synthétisé par M. STEENHOUDT [22] :

- Zone d'infiltration :
 - . coulées fissurées et scories non altérées en surface structurale et fond de ravine,
 - . formation détritique à sol peu évolué,
- Régions imperméables discontinues à l'origine de petites nappes perchées :
 - . coulées massives,
 - . sills et dykes massifs,
 - . coulées boueuses,
 - . formation argilisées,
 - . pyroclastiques à matrice cendreuse,
- Horizons imperméables généralisés ou régionaux :
 - . formations affectées par le phénomène de "self-sealing" (zéolitisation des premières phases du Piton des Neiges),

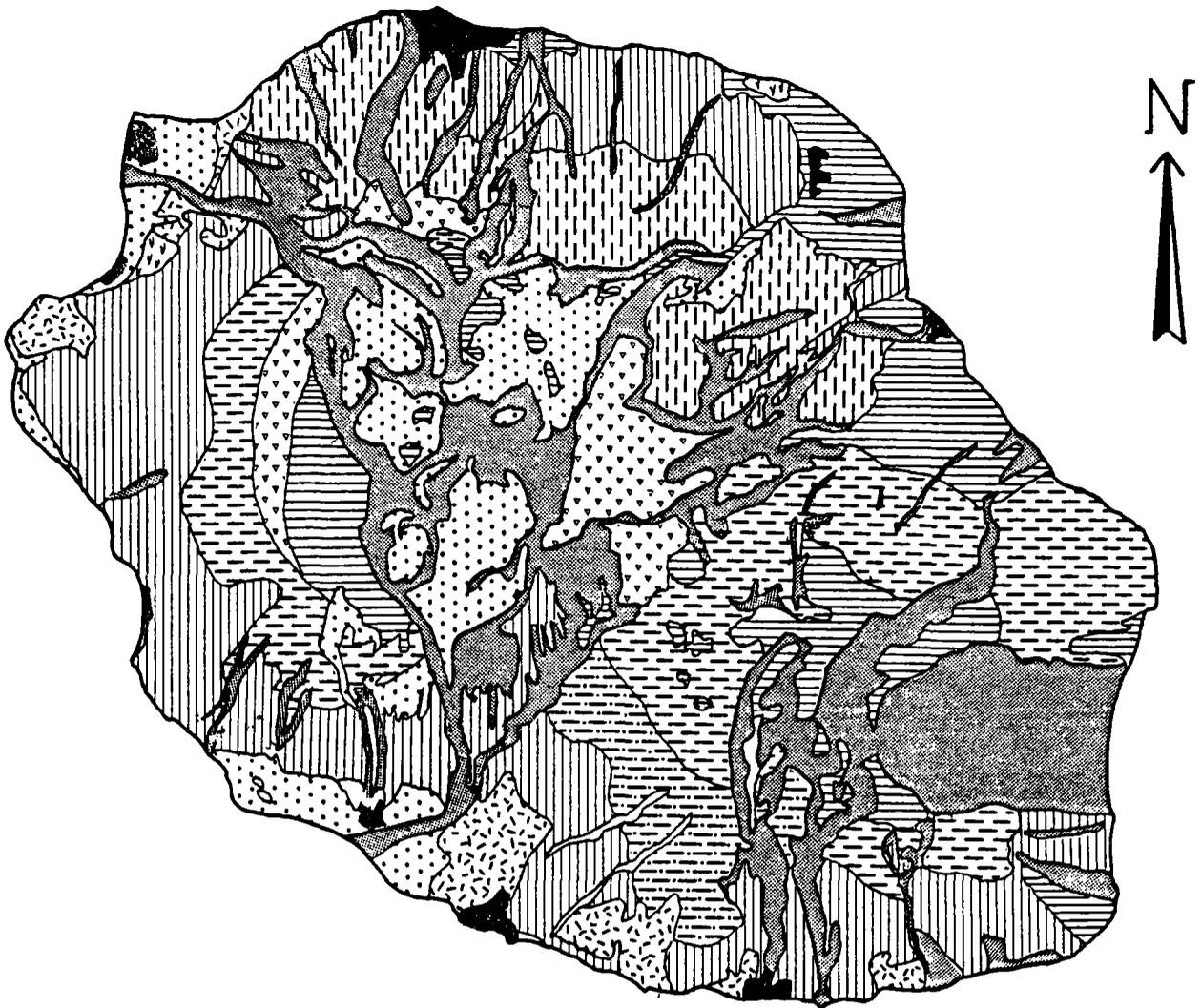
- . paléosols d'interphase à évolution argilo-latéritique avancée (entre phases II et III),
- . tuffs,
- Réservoirs aquifères :
 - . coulées fissurées et scories,
 - . alluvions propres,
- Principaux axes de drainage :
 - . paléoréseau hydrographique,
 - . tunnels de laves,
 - . le long des intrusions (dykes fissurés).

1.4. Pédologie

L'âge et la nature des roches associés aux facteurs climatiques (précipitation et température) permettent d'observer à La Réunion les catégories de sols allant du lithosol (roche mère affleurante) au sol très évolué (sol ferrolitique). Le maximum d'évolution se rencontre ainsi sur les matériaux assez ancien et sous les conditions climatiques alliant des températures assez élevées et une forte pluviosité (tranche de 1000 à 1500 m de la zone au vent).

J. RIQUIER et al. [1] ont ainsi réparti les sols réunionnais :

- Sols minéraux bruts. Ils comprennent les sols d'érosion ou lithosols (remparts des cirques du Piton des Neiges), les sols d'apport alluvial (lit majeur des principales rivières) et les sols d'apport volcanique (coulées récentes du Piton de la Fournaise).
- Sols peu évolués. Ils ne présentent pas d'horizon d'accumulation, mais par contre l'horizon humifère est bien marqué. Ils se développent à partir des sols d'érosions (dans les cirques) ou des sols d'apports alluvial ou éolien (côte sous le vent). Ce sont le plus souvent des sols très perméables et à faible capacité de rétention en eau.
- Andosols. Ils sont caractérisés par la présence de produits amorphes. Ils se développent sur matériaux récents et dans les régions très arrosées, et ont généralement une forte teneur en eau. On peut distin-



LEGENDE

	Sols minéraux bruts		Sols brunifiés
	Sols peu évolués		Sols podzolisés
	Andosols peu différenciés		Sols ferralitiques peu désaturés
	Andosols désaturés		Sols ferralitiques fortement désaturés
	Andosols perhydratés		Sols hydromorphes



Ville importante

FIG. I.7 - Carte pédologique simplifiée de La Réunion
Simplification de la carte établie par l'O.R.S.T.O.M.
et éditée dans l'ATLAS de La Réunion

guer les andesols suivants :

- . peu différenciés : ils se distinguent des sols peu évolués par une évolution minérale poussée, ils sont très acides et apparaissent soit en altitude (Grand Bénard) ou sur les formations récentes de basses altitudes (St-Benoit),
 - . désaturés non perhydratés : la dessiccation modifie assez peu la teneur en eau, on les rencontre sur la plaine des Cafres,
 - . désaturés perhydratés : la dessiccation présente un caractère irréversible très prononcé, ils apparaissent dans les zones plus humides que les précédents (Plaine des Palmistes, plaine des Makes).
- Sols brunifiés. Ils présentent un profil A-B-C peu épais, mais ce sont des sols riches. Ils apparaissent dans la région sous le vent à faible altitude (Haut de St-Pierre, La Possession).
 - Sols podzolisés. L'altération de la matière minérale avec entraînement du fer et de l'aluminium se traduit par l'apparition d'un horizon A 2. Ils sont souvent associés à des andosols et apparaissent aussi bien sur matériaux anciens (Brulé de St-Paul) que récents (lapillis de la Fournaise en bordure de la rivière des remparts).
 - Sols ferrallitiques. Ils sont caractérisés par une altération poussée des minéraux primaires. Ils ont également un profil A-B-C avec un horizon B peu épais. Ils ont une teneur en eau assez élevée et sont d'autant plus désaturés en bases que le climat est agressif (chaleur et surtout forte pluviosité). Ils sont présents sur les basses pentes du Piton des Neiges et dans la région de St-Joseph - St-Philippe. Ceux faiblement à moyennement désaturés constituent l'essentiel des sols de culture de la canne à sucre.
 - Sols hydromorphes. Ils correspondent à des zones marécageuses et sont caractérisés par un horizon tacheté de rouille reposant sur un horizon de gley lié à la nappe phréatique. Ces sols sont localisés à l'étang de St-Paul et à l'embouchure des rivières St-Jean à l'est de Ste-Suzanne.

1.5. Végétation

Suite aux conditions naturelles et aux actions anthropiques, la répartition des différentes formations végétales est essentiellement commandée par l'altitude comme en témoigne l'image LANDSAT (fig. I.8). Le traitement en fausse couleur fait ressortir en rouge les zones correspon-

dant aux maximums d'activité chlorophyllienne. Il s'agit essentiellement de la forêt qui, avec 90 000 ha, reste la formation végétale dominante de l'île, son extension s'est progressivement réduite (surtout au 18^e et 19^e siècle) avec la mise en valeur agricole. Bien que pouvant débiter dès le littoral, et dans les lits des ravines (forêts galeries très visibles sur l'image satellite), son domaine de prédominance commence vers 500 à 700 m sur la côte au vent et plutôt 700 à 1000 m sur la côte sous le vent, et s'étend jusque vers 1800 m. Les "bois de couleur" dominent jusqu'à 1400 m surtout sur la côte au vent ; cette forêt est équivalente aux forêts denses des régions tropicales humides (nombreux arbustes enchevêtrés ne dépassant pas 10-15 m). Au delà pousse la forêt de tamarin. A partir de 1800 m, la forêt fait place progressivement à une végétation éricoïde "les branles" qui se disperse avec l'altitude pour laisser la roche nue aux sommets (passage progressif du rouge au brun rouge, puis brun vert sur l'image satellite, fig. I.8).

Si elle occupe toute la côte "au vent", la forêt apparaît plus clairsemée sur la côte "sous le vent", à l'exception de la forêt des Makes, du Dimitile et des "hauts" de St-Joseph.

A l'intérieur des cirques, la végétation se concentre au pied des remparts (uniquement les remparts du côté Est dans Mafate et Cilaos).

L'homme a essentiellement défriché les basses pentes et la majorité des 80 000 ha mis en culture ou reboisés se concentre entre la côte et 700 m (1500 m sur les "hauts" de l'Ouest et la plaine des Cafres). La canne à sucre domine jusqu'à 700 m. Au delà, il s'agit de la culture de géraniums, ou plantes rivières, des zones d'élevage ou des reboisements. Le parcellaire apparaît nettement sur les basses pentes du secteur au vent (fig. I.8). Les champs de canne présentent des teintes allant du bleu vert (champs coupés) au rose. La canne à sucre présenterait donc une activité chlorophyllienne moindre que la forêt : à cette époque, la croissance de la canne est très ralentie. La coupe est déjà bien commencée sur l'île.

Sur la bande côtière sous le vent (0 à 300 m d'altitude), la savane s'est installée sur des sols trop secs pour toute culture (signature bleu-vert sur l'image satellite).

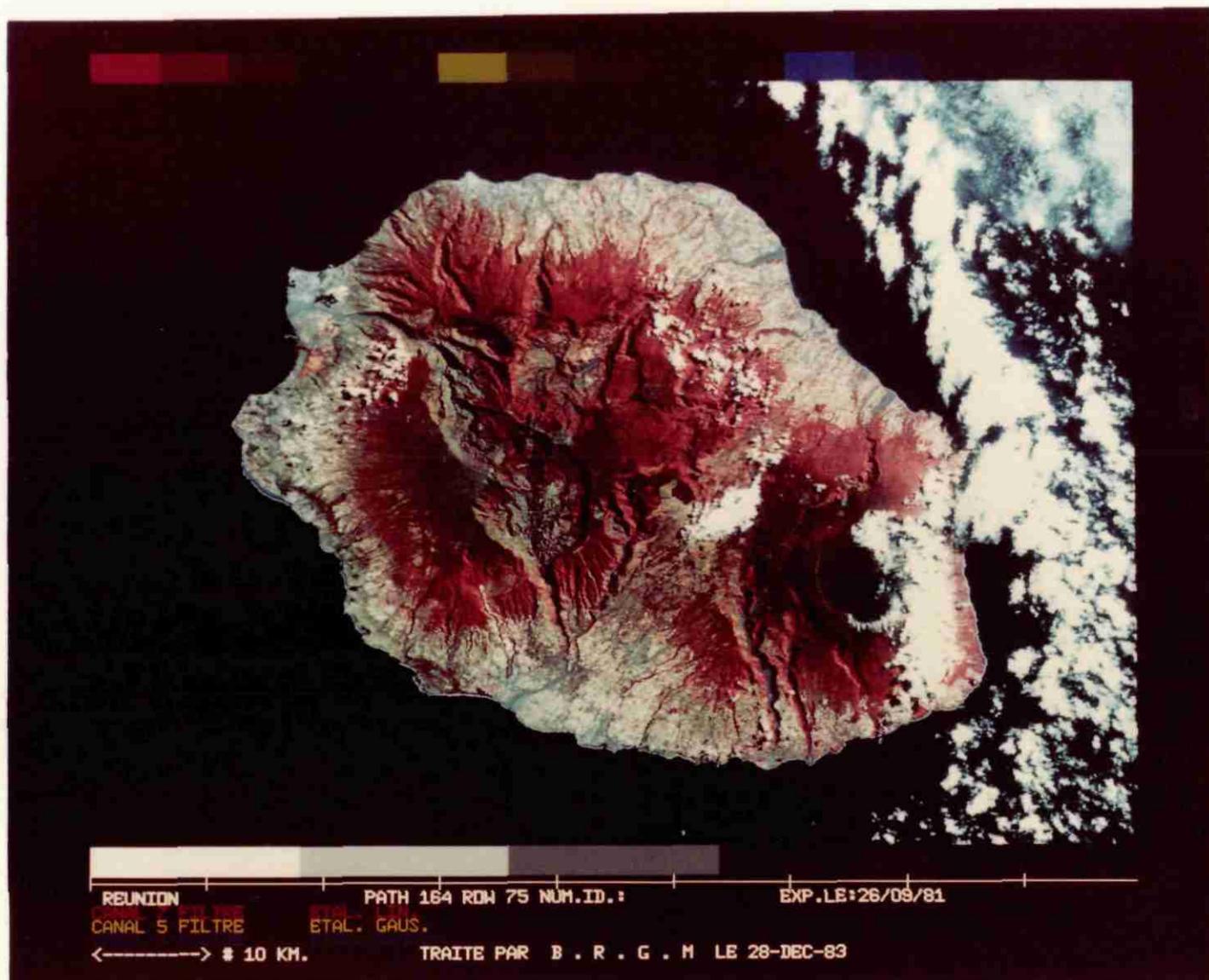


FIG. I.8 - Exploitation d'une image LANDSAT (N.A.S.A.) de l'île de La Réunion - Cliché du 26.09.81, échelle approximative 1/575.000e
 Traitement en fausses couleurs réalisé par le B.R.G.M. Orléans
 rouge (canal 7), vert (canal 5), bleu (canal 4), étalement dynamique

On remarque la distribution très nette de la végétation en fonction de l'altitude. La couleur rouge correspond aux formations ayant le maximum d'activité chlorophyllienne, en l'occurrence, il s'agit de la forêt ; les forêts galeries notamment apparaissent très nettement au niveau des zones de cultures.

2. INVENTAIRE DES DONNEES HYDROCLIMATIQUES DE L'ILE DE LA REUNION

2.1. Inventaire des données climatologiques

Le Service Météorologique de La Réunion gère le réseau de mesures climatologiques sur l'ensemble de l'île. Ces diverses mesures font l'objet de publications mensuelles et de résumés annuels.

Les quatre stations de Gillot, Le Port, St-Pierre et la Plaine des Cafres sont rattachées au réseau des stations synoptiques de l'Océan Indien, et enregistrent différentes variables climatiques (précipitation, température, insolation, hygrométrie, vent, évaporation). De nombreux autres postes répartis sur l'ensemble de l'île ne mesurent eux que certaines de ces variables. Leur nombre va en décroissant selon qu'ils enregistrent la hauteur de pluie, la température ou l'insolation.

2.1.1. Pluviométrie (cf fig. I.9)

Le réseau actuel compte plus de 130 postes donnant des valeurs journalières de la pluviométrie. Dans la plupart des cas, il s'agit de pluviomètres de type "association" à relevés quotidiens, mais certains de ces postes (37) fournissent des enregistrements en continu (par pluviographe à augets basculeurs). Dans les deux cas, la surface réceptrice de ces appareils est de 400 cm².

En y ajoutant les divers postes qui, au cours d'une période passée, ont également enregistré les hauteurs de pluie, on arrive ainsi à environ 180 postes sur l'ensemble de l'île, soit une densité moyenne de un poste pour 14 km² (sur le territoire métropolitain, la densité moyenne est de 1 poste pluviométrique pour 140 km²).

La répartition de ces postes n'est toutefois pas homogène ; deux secteurs, en effet, présentent une densité particulièrement élevée des postes ; il s'agit de :

- la bande côtière de St-André à la rivière des Pluies dans le Nord-Est de l'île,
- la région de St-Pierre - St-Louis dans le Sud-Ouest.

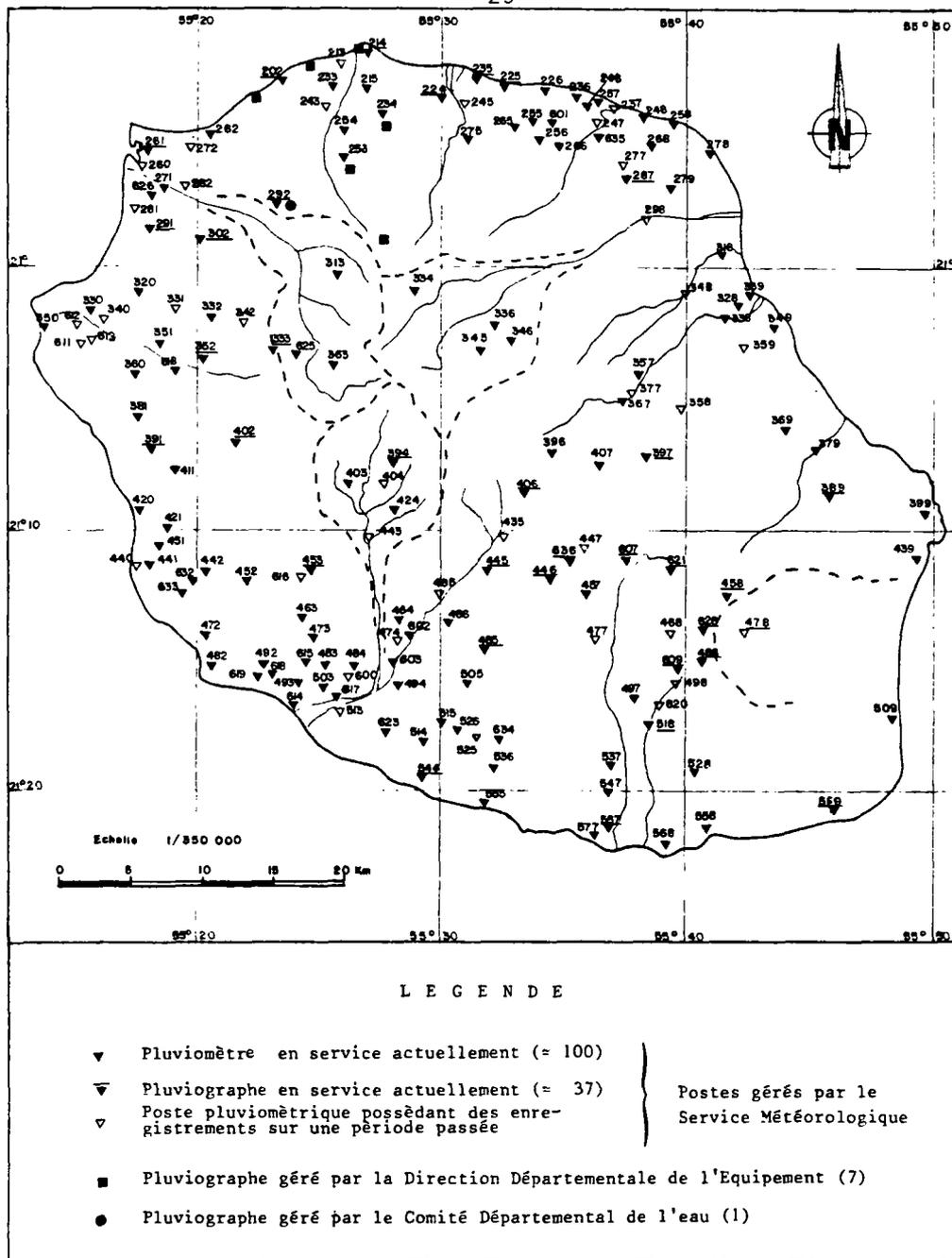


FIG. I.9 - Implantation des postes pluviométriques à La Réunion (voir annexe I)

Dans ces deux zones qui se trouvent être les plus importantes de l'île pour la production sucrière, la densité de postes est de l'ordre de un poste pluviométrique pour 4 km². Il convient de souligner que les sucriers sont à l'origine de la création de ce réseau pluviométrique réunionnais et assurent encore une grande partie des relevés.

A l'opposé d'autres régions sont plutôt dépourvues de postes :

- le massif du Piton de la Fournaise et notamment le secteur du Grand Brûlé - Hauts de St-Philippe : on ne compte que 2 postes pour une superficie de 250 km² ;
- le secteur des "hauts", au N.E. de l'île, en amont de la bande côtière précédemment citée, limitée par la rivière de St-Denis, la rivière du Mât et le rempart Nord du cirque de Salazie ; cette zone d'une superficie de 150 km² ne comporte aucun poste.

Si des imprécisions demeurent dans ces secteurs, on peut néanmoins cerner la pluviométrie globale de l'île et suivre l'évolution de celle-ci tant dans l'espace que dans le temps.

A partir de ces données, la Direction de la Météorologie cartographie les isohyètes interannuelles, annuelles, parfois mensuelles et même des épisodes exceptionnels (passages de dépressions cycloniques).

On peut signaler également la mise en place récente de pluviographes par différents organismes en vue d'études ponctuelles :

- La Direction Départementale de l'Équipement gère ainsi 6 pluviographes dans la région de St-Denis :
 - . trois permettant de suivre la pluviométrie sur le bassin versant de la Ravine de Patates à Durand,
 - . trois suivent la pluviométrie le long de la route en corniche St-Denis - Le Port, et constituent un élément de décision pour la fermeture de cette route à la circulation.
 Ces appareils à rotations journalières permettent de connaître précisément l'intensité de la pluie sur des pas de temps jusqu'à 5 mn.
- Un pluviographe a également été mis en place à Grand Coin (Dos d'Ane) à la demande du Comité Départemental de l'Eau en novembre 1980.

2.1.2. Température (fig. I.10)

52 postes possèdent des enregistrements de températures journalières, mais seulement une trentaine sont en service actuellement. Ces postes sont équipés de thermomètres à minima et à maxima, certains de thermographes. Leur répartition est assez homogène sur l'ensemble de

l'île, si ce n'est une lacune relative sur les pentes Sud et Est du Massif du Piton de la Fournaise. Cependant, l'île étant située dans la zone intertropicale, la répartition des températures, surtout influencée par l'altitude, est bien connue sur l'ensemble de l'île et s'avère assez constante d'une année sur l'autre.

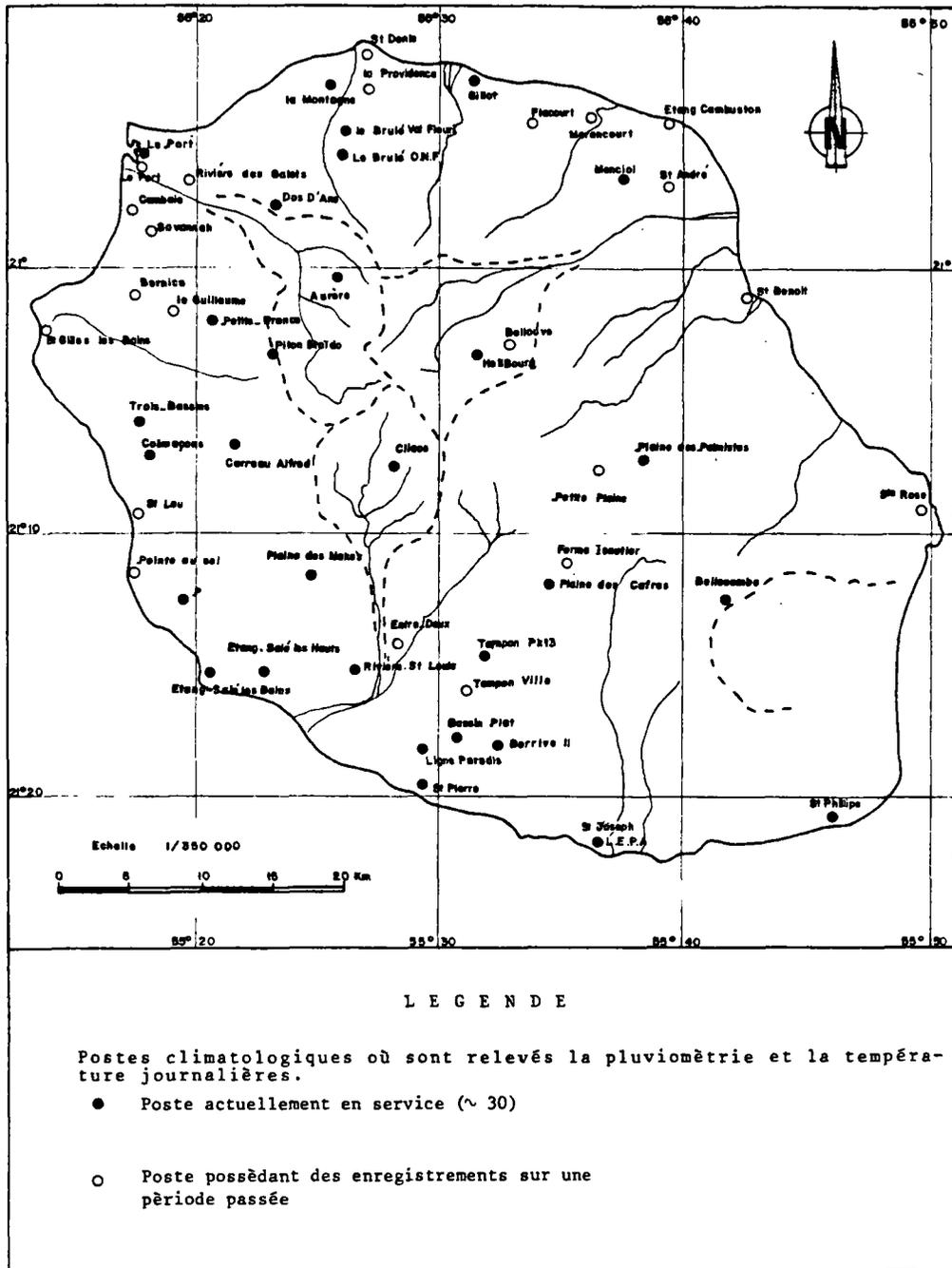


FIG. I.10 - Implantation des postes thermo-pluviométriques à La Réunion

2.1.3. Insolation et radiation solaire (fig. I.11)

17 héliographes "CAMPBELL" assurent la couverture du département ; ce nombre est insuffisant pour connaître précisément l'insolation sur l'ensemble de l'île, étant donné l'extrême variabilité de la couverture nuageuse, mais nous permet tout de même une approche de sa répartition.

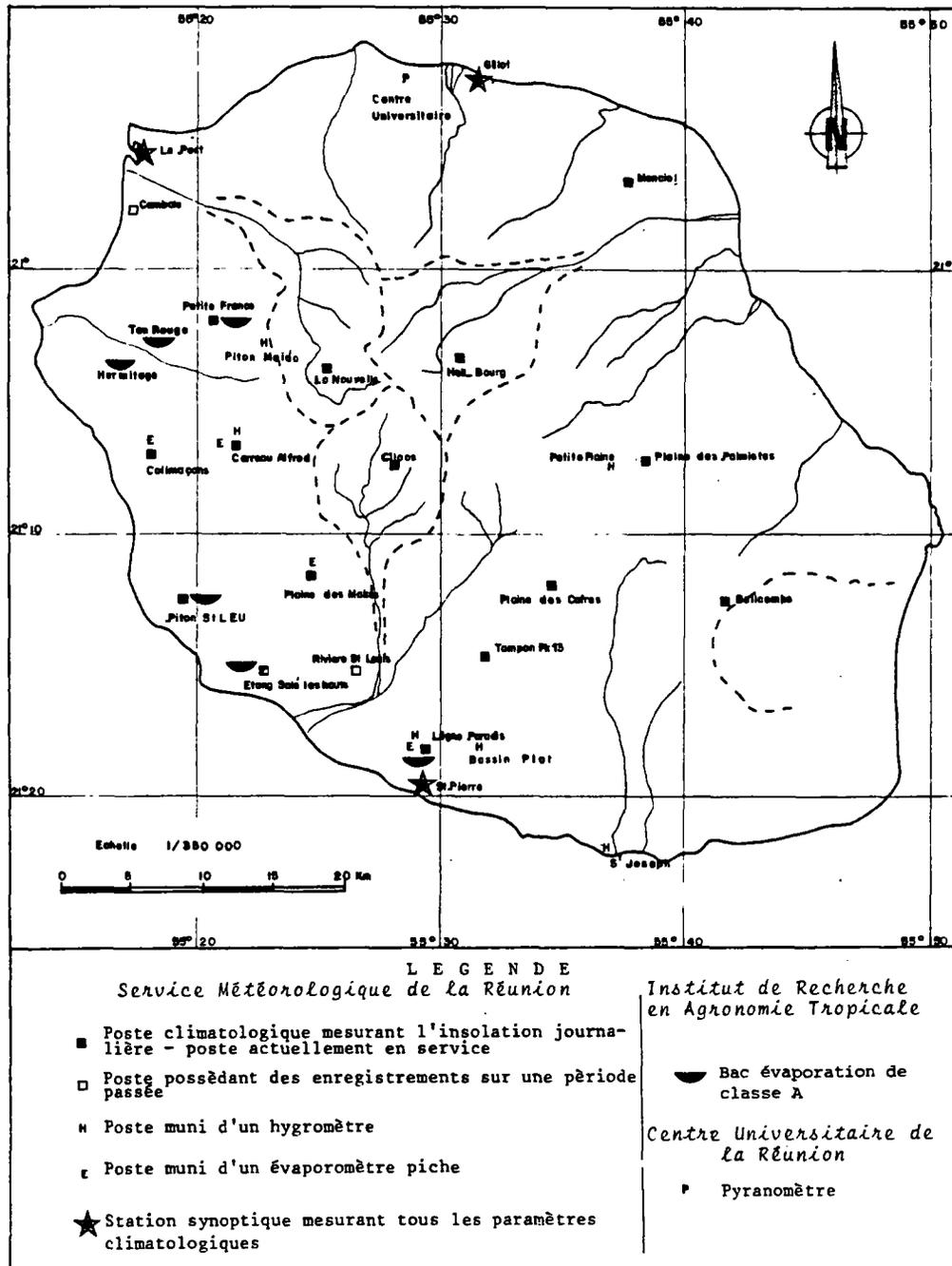


FIG. I.11 - Implantation des postes mesurant divers paramètres climatologiques

Le Service Météorologique utilise ces résultats pour calculer la valeur de l'évapotranspiration potentielle selon la formule mensuelle de Turc.

Avec le développement des énergies nouvelles, le Commissariat à l'Energie Solaire et la Région financent l'installation de pyranomètres pour évaluer le rayonnement total, sous la responsabilité du Centre Universitaire et du Service Météorologique de La Réunion. Une installation comprenant un pyranomètre et un diffusomètre fonctionne déjà au Centre Universitaire de St-Denis.

2.1.4. Autres paramètres

L'hygrométrie et l'évaporation par évaporomètre Piche sont mesurées à une dizaine de stations.

Les quatre stations météorologiques de Gillot, Le Port, St-Pierre et Plaine des Cafres sont munies de bacs évaporation de classe A. Ce réseau est complété par 6 bacs identiques gérés par l'Institut de Recherche en Agronomie Tropicale, sur la côte Ouest de l'île.

Les vitesses et directions du vent sont mesurées par anémomètres et girouette "Chauvin Arnoux" aux quatre stations météorologiques.

Cette répartition de ces stations, somme toute correcte, pourrait être améliorée par l'établissement d'une cinquième station dans la zone de St-Benoît - Ste-Rose.

2.2. Inventaire des données hydrométriques (fig. I.12)

Le réseau hydrographique actif de La Réunion se concentre principalement dans le quart N.E. du département, de la rivière des Marsouins à la rivière St-Denis. Les autres rivières pérennes sont celles drainant les cirques de Mafate et de Cilaos -respectivement la rivière des Galets et le Bras de Cilaos-, le Bras de la Plaine prenant sa source sur les pentes S.E. du Piton des Neiges et les rivières des Remparts, Langevin et de l'Est qui ceignent le massif du Piton de la Fournaise. Certaines

régions ne présentent que de très faibles écoulements permanents ; ce sont la façade W, les plaines des Cafres et des Palmistes, les pentes Est du Piton de la Fournaise.

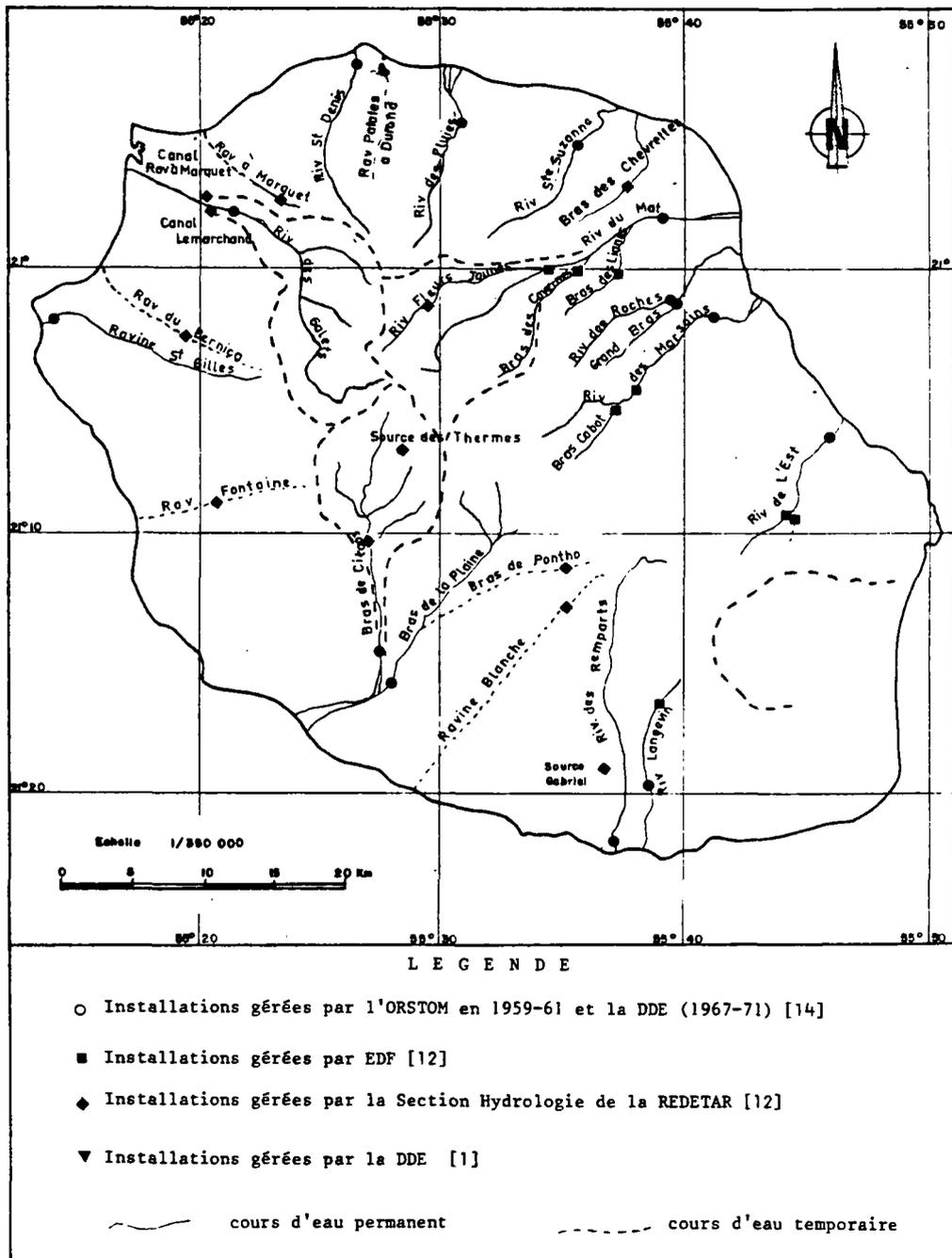


FIG. I.12 - Réseau hydrographique réunionnais et implantation des stations de jaugeage .

La majeure partie de l'écoulement survient à la suite du passage des dépressions cycloniques occasionnant des crues violentes dont la mesure est délicate, voire impossible.

Aucun débit de rivière de département n'a été suivi en continu, de façon systématique ; cependant, au cours des 20 dernières années, les principaux cours d'eau de La Réunion ont fait l'objet d'enregistrements plus ou moins continus, sur plusieurs années consécutives. Différents organismes ont assuré ou effectuent actuellement ces relevés ; les principaux en sont l'Office de Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.) [16], la Direction Départementale de l'Équipement (D.D.E.) [13], la Direction Départementale de l'Agriculture (D.D.A.) [6], l'Électricité de France, et la section hydrologique de la Régie Départementale des Travaux Agricole et Ruraux (REDETAR).

2.3. Inventaire des données relatives aux eaux souterraines (fig. I.13)

La mesure des débits d'une quinzaine de sources est effectuée par la section hydrologique de la REDETAR (cf § 2.2. Hydrométrie), et donne ainsi quelques renseignements sur les eaux souterraines de La Réunion qui sont assez mal connues.

De nombreux forages ont été réalisés surtout dans les zones côtières, mais beaucoup ont été détruits, quelques-uns sont en exploitation, peu sont équipés de piézomètres en état. Les secteurs les mieux équipés sont :

- la plaine des Galets (communes du Port et de la Possession) : suivi régulier de 17 piézomètres depuis 1975, ce qui permet aujourd'hui une bonne connaissance de cet aquifère multicouche,
- la commune de St-Denis : 4 depuis 1974, 6 en 1975, on compte depuis mai 1982 17 piézomètres disponibles mesurés périodiquement,
- la commune de St-Louis : une dizaine de piézomètres sont suivis depuis août 1982 (2 ont été relevés de 1973 à 1980).

L'extension de ce réseau à l'ensemble de l'île se poursuit lentement notamment entre St-Paul et St-Leu (côte ouest) et vers Ste-Marie et St-André (côte Est).

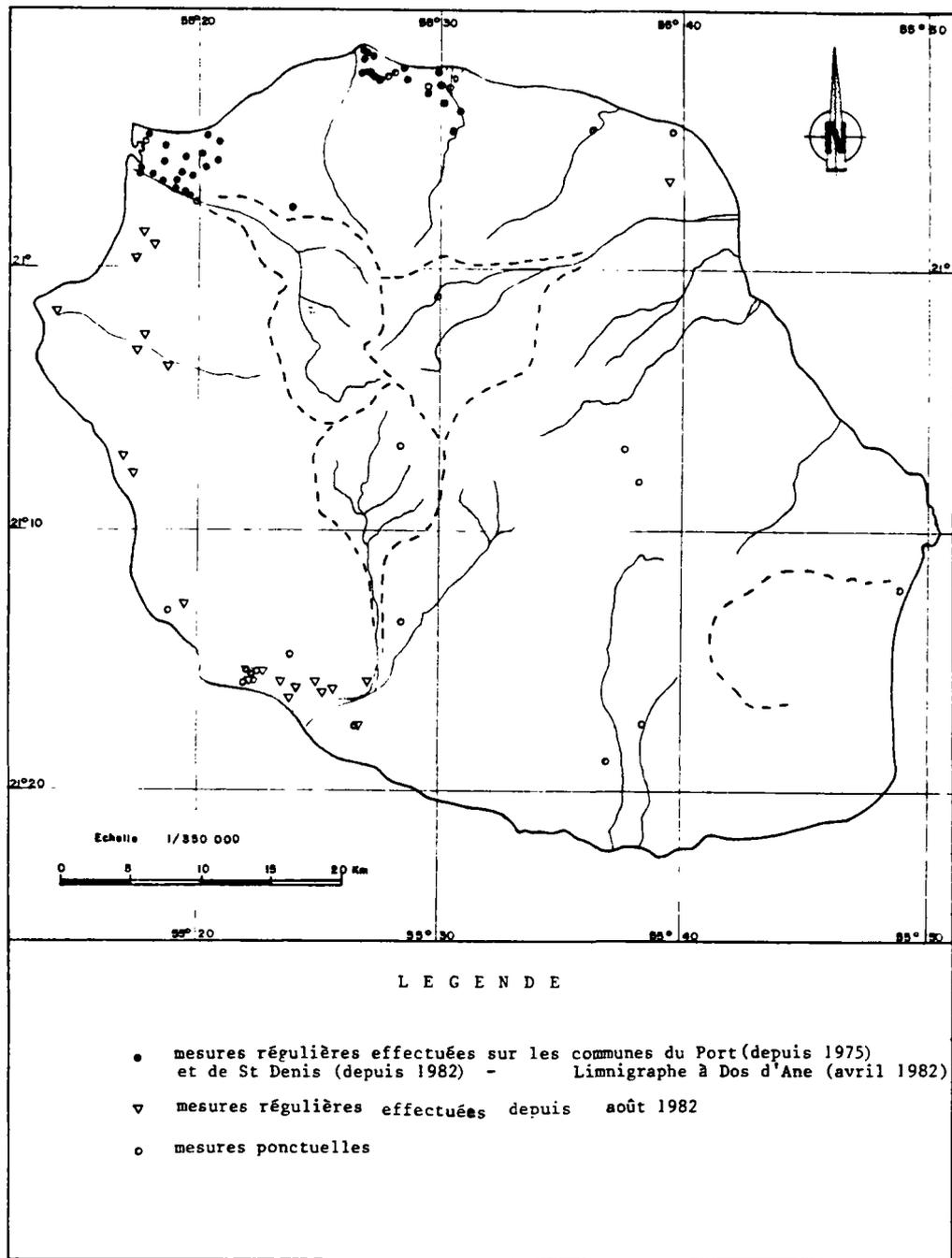


FIG. I.13 - Relevés piézométriques effectués par le Service Géologique Régional de La Réunion

Ces différents résultats sont collectés par la Banque de Données du Sous-sol (BSS) [7] gérée par le Service Géologique Régional de La Réunion. On doit malheureusement déplorer que certains ouvrages soient réalisés sans autorisation ou du moins sans communication aux gestionnaires de cette banque et qu'une grande partie de l'information soit ainsi méconnue ou perdue.

3. METHODOLOGIE D'APPROCHE DE LA RESSOURCE RENOUVELABLE EN EAU SUR L'ENSEMBLE DE L'ILE

3.1. Cadre spatio-temporel de l'étude

En regroupant en un seul terme, la pluie efficace, la quantité d'eau constituant le ruissellement de surface et l'infiltration, nous affranchissons par là même de l'obligation d'utiliser l'unité hydrologique couramment admise pour les calculs de bilans : le bassin versant.

En effet, l'approche de la pluie efficace par bassins versants si elle présente l'avantage de fournir des valeurs que l'on peut directement confronter aux valeurs de ruissellement présentent au niveau de l'étude globale que nous envisageons sur l'ensemble de l'île différents inconvénients :

- Délimitations parfois imprécises de ceux-ci. En considérant les crêtes topographiques, les ingénieurs de l'O.R.S.T.O.M. ont obtenus sur différentes rivières (Ravine St-Gilles, Rivières Langevin) des coefficients de ruissellement supérieurs à 1. Certaines régions (Piton de la Fournaise) présentent peu ou pas de traces de ruissellement et sont difficilement rattachables à tel ou tel bassin.
- Plusieurs d'entre-eux présentent des contrastes climatiques (surtout les hauteurs de précipitations) très élevés qu'il semble imprécis de réduire à une seule valeur représentative du bassin.
- La distinction de sous-bassins ou le regroupement de différentes parties de bassins versants (zones d'altitude supérieures à 500 m par exemple) implique une nouvelle estimation des différents paramètres utilisés.

Aussi, il nous a semblé plus intéressant de réaliser cette approche de la pluie efficace globale à l'aide d'un maillage assurant une couverture homogène de l'île :

- Les valeurs des différents paramètres en chaque maille sont directement comparables entre divers secteurs de l'île.
- La dimension de la maille doit permettre de rendre compte des variations spatiales des différents paramètres, tout en gardant à chacun

de ces paramètres une relative homogénéité (la valeur au centre de la maille devant être aussi représentative que possible de l'ensemble de la maille).

- Considérée comme surfaces élémentaires de références, les mailles peuvent être regroupées pour décrire un bassin versant, une tranche d'altitude, un secteur géographique ou administratif.

Pour réaliser cette étude, les principaux facteurs à choisir sont :

- la dimension des mailles, conditionnant le nombre de mailles,
- la période de référence et le pas de temps conditionnant le nombre de valeurs des différents paramètres à estimer en chaque maille,

la multiplication du nombre de mailles par le nombre de valeurs des paramètres donnant le nombre total de valeurs des différents paramètres sur l'ensemble de l'île.

3.1.1. Dimensions des mailles

Dans le double souci d'obtenir en chaque maille des valeurs représentatives de l'ensemble de la maille pour les différents paramètres, et de rendre compte de la variabilité spatiale des divers paramètres, notre choix s'est fixé sur une dimension des mailles de 3 km (fig. I.14).

Le quadrillage a, au préalable, été effectué sur la carte topographique à 1/50 000e (I.G.N.) ; il est basé sur les coordonnées GAUSS LABORDE figurées sur la carte citée. Pour les mailles côtières, nous les avons considérées si la surface émergée représente au moins 10 % de la superficie des mailles en question.

Les 304 mailles retenues apparaissent numérotées de bas en haut, et de gauche à droite (en fait cette numérotation a été effectuée après rotation de 90° vers l'Ouest, pour simplifier la cartographie automatique - repère X.Y (X=y, Y=-x)).

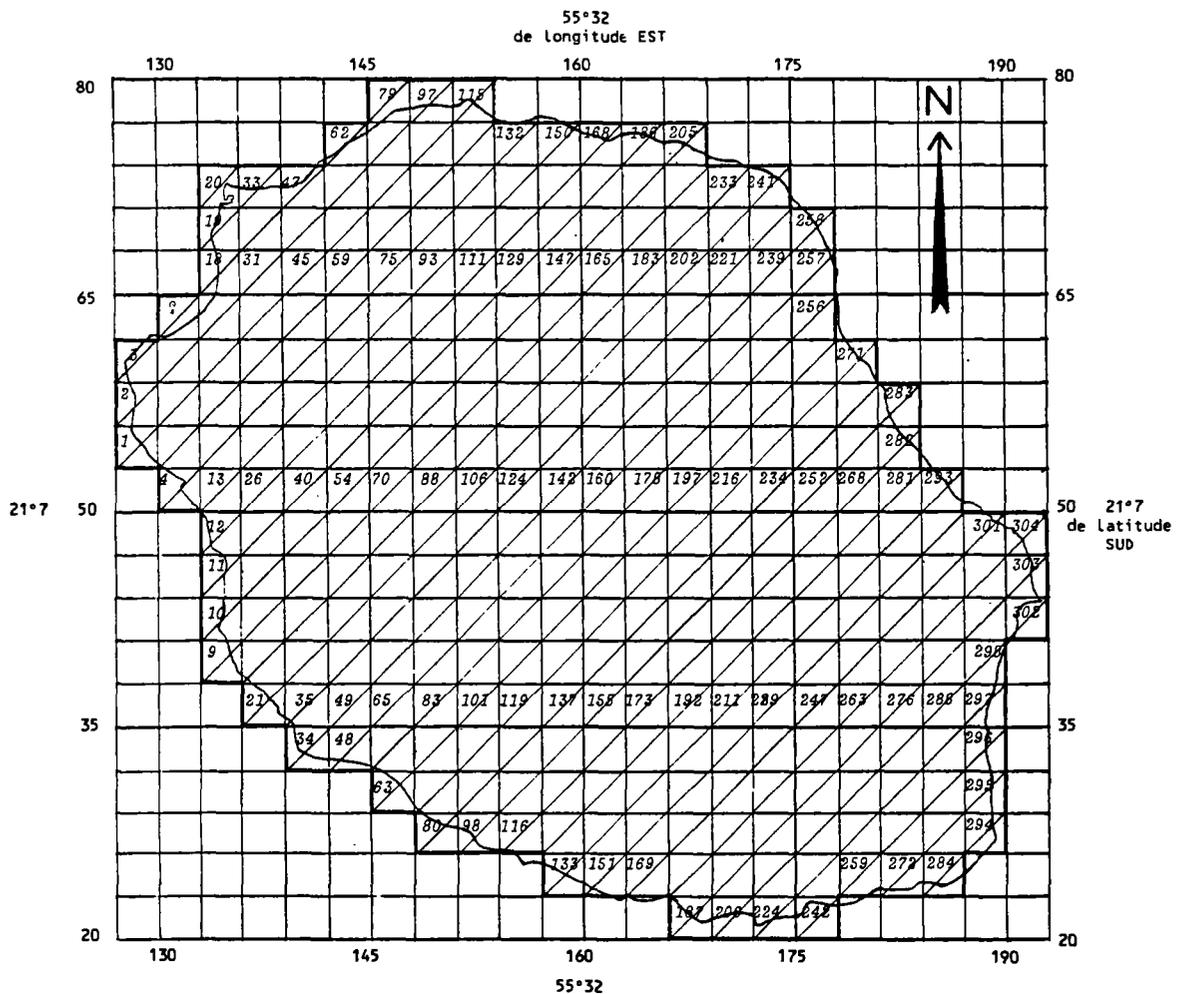


FIG. I.14 - Découpage de l'île de La Réunion, en mailles de 3 km de côté

3.1.2. Période de référence

L'Organisation Mondiale de la Météorologie préconise une période de référence de 30 ans au moins pour le calcul des moyennes de pluviométrie. Mais l'extension du réseau pluviométrique à La Réunion est relativement récente. En effet, si les premiers postes (≈ 20) ont été mis en place dès le début du siècle par les sucriers, il faut attendre la restructuration de ce réseau par la Météorologie Nationale après les années 1950 pour voir le nombre de postes atteindre successivement 70 en 1954, 85 en 1959, 112 en 1964, culminer à près de 150 au début des années 1970 pour se stabiliser vers 130 actuellement.

Le nombre de postes ayant fonctionné pendant 30 ans est insuffisant pour envisager une extension correcte de la pluviométrie à l'ensemble de l'île.

Bien qu'il soit possible de travailler sur près de 100 postes ouverts depuis 1960 ou avant, c'est-à-dire possédant au moins 20 années consécutives de mesures, la plupart de ces postes sont concentrés sur les régions littorales, l'extension du réseau aux régions centrales de l'île surtout le massif de La Fournaise n'a commencé que durant les années 1960-1970.

Pour réaliser notre évaluation régionale de la pluie efficace, il est nécessaire de travailler sur des périodes concomitantes, les stations concernées devant assurer une couverture aussi complète que possible de l'île. Ainsi, nous avons choisi la période 1971-1981.

La moyenne sur 11 ans est tout de même assez stable ; BINNIE, en confrontant les résultats de 53 stations pluviométriques réparties sur tout le globe estime que pour la majorité des stations, la moyenne décennale rend compte à moins de 10 % près (8.22) de la moyenne réalisée sur 50 ans.

La fermeture de postes météorologiques (près de 40 pluviomètres ont été supprimés depuis 1971), le remplacement de certains, la création d'autres dans des régions jusqu'alors déshéritées (notamment sur le Piton de La Fournaise), ainsi que la publication régulière des différentes données climatologiques tant brutes qu'élaborées, nous incitent à penser que le Service Météorologique apporte un sérieux accru dans la collecte et surtout la critique des données.

Ce phénomène observé pour la pluviométrie est peut-être encore plus sensible pour les autres paramètres climatologiques :

- Installation de deux nouvelles stations météorologiques complètes (cf fig. I.5), le Port et la Plaine des Cafres au cours de la dernière décennie,
- Sur les 17 héliographes fonctionnant actuellement (cf fig. I.5), 6 seulement étaient en place avant 1962.

La mise en place des appareils enregistreurs (pluviographes...) permet de pallier à certaines défaillances humaines. Les pluviomètres sont relevés par des bénévoles dont il est parfois permis de douter du sérieux.

Enfin dans l'optique d'une utilisation de ces résultats pour une étude de bilan hydrologique plus complète, on rappelle (cf § 1.2) que le suivi assez régulier des rivières du département n'a recommencé qu'en 1971, et même surtout après 1976.

3.1.3. Pas de temps

Dans l'optique d'une évaluation globale au niveau de l'île de la pluie efficace, nous avons choisi de réaliser cette étude au pas de temps mensuel. Même si l'épisode pluvieux est assez aléatoire à La Réunion et ne dure souvent que quelques heures, voire quelques jours, il existe cependant un contraste saisonnier très marqué entre un été chaud et humide soumis aux dépressions tropicales, et un "hiver" plus sec et plus froid, l'évolution étant cependant assez progressive au cours de l'année, l'étude mensuelle devrait bien traduire ces variations.

La collecte des données s'en trouve simplifiée car les différentes publications du Service Météorologique de La Réunion font état des valeurs mensuelles des divers paramètres climatiques. Ces paramètres sont cependant mesurés quotidiennement (voire plusieurs fois par jour ou en continu) et les données journalières sont accessibles.

Nous essaierons de quantifier l'imprécision liée à cette approche mensuelle en la comparant localement à une approche décadaire ou journalière.

3.2. Extension des données

Une fois définis les paramètres climatologiques nécessaires à cette approche de la pluie efficace : précipitation, température, insolation, etc..., le problème est ensuite d'obtenir 132 valeurs mensuelles aux différentes mailles de l'île pour chacun des paramètres à partir des enregistrements plus ou moins complets disponibles.

Les étapes successives de ce travail sont résumées ci-dessous.

INVENTAIRE ET COLLECTE DES DONNEES

d'après fichiers du Service Météorologique de La Réunion

Pour chaque paramètre : pluviométrie (P), température (T),
et insolation (I), on relève n_x valeurs à X stations :

$$n_x \leq 132$$

CRITIQUE DES DONNEES

Elimination des stations trop incomplètes ≥ 20 % de
lacunes ou donnant des résultats suspects

$$\longrightarrow n_{x'} \text{ valeurs à } X' \text{ stations} \quad \begin{array}{l} X' \leq X \\ n_{x'} \leq 132 \end{array}$$

EXTENSION DES DONNEES DANS LE TEMPS

Détection des valeurs manquantes et bouchage des lacunes
par corrélations multiples ou simples entre stations
voisines.

$$\longrightarrow 132 \text{ valeurs à } X' \text{ stations}$$

EXTENSION DES DONNEES DANS L'ESPACE

Etablissement de relations entre les paramètres climatolo-
giques et des variables explicatives de la variabilité de
ces paramètres (ex : altitude pour la température).

Cartographie de ces variables explicatives. Attribution de
valeurs aux mailles.

Application des relations établies à chaque maille.

Vérification de cette méthode sur mailles témoins.

$$\longrightarrow 132 \text{ valeurs à } 304 \text{ mailles}$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ATLAS des départements français d'outre-mer. 1. La Réunion .- C.N.R.S. et I.G.N., Paris, 1975.
- [2] BENDERITTER et al. (1981) .- Evolution du potentiel géothermique de l'île de la Réunion - Géologie et géophysique, données acquises au 1er octobre 1981 .- Rapport B.R.G.M. 81 SGN 669 GTH, 305 p. + 6 fascicules.
- [3] BILLARD G. (1974) .- Carte géologique de la France - La Réunion, 4 feuilles + notice, échelle 1/50 000 .- en collaboration avec P.M. VINCENT
- [4] BUSSIÈRE (1967) .- Carte géologique de la France, département de La Réunion, à 1/100 000e, 1 carte + 1 notice.
- [5] BUSSIÈRE P. (1959) .- Etude géologique de l'île de la Réunion .- Travaux du Bureau Géologique de Madagascar, n° 84, 64 pp + pl. + carte.
- [6] BOCQUEE F. (1976-1983) .- Annuaire hydrométrique .- D.D.A. La Réunion.
- [7] B.R.G.M. .- Banque de données du sous-sol - Recueil de données concernant les eaux souterraines de La Réunion.
- [8] CHEVALLIER L. (1979) .- Structures et évolution du volcan Piton des Neiges, Ile de La Réunion - Leurs relations avec les structures du bassin des Mascareignes, Océan Indien occidental .- Thèse 3ème cycle, Grenoble.
- [9] CUSTODIO E. (1978) .- Geohidrologià de terrenos e islas volcànicas .- Madrid, Instituto de hidrologie, 303 p.
- [10] DEFOS DU RAU J. (1959) .- Le relief de l'île de La Réunion .- Thèse, Institut de Géographie, Fac. des Lettres, Bordeaux.
- [11] DIRECTION DE LA METEOROLOGIE .- Bulletins climatologiques mensuel et annuel .- Service Météorologique de La Réunion
- [12] DIRECTION DE LA METEOROLOGIE (1981) .- Fichiers informatiques METEO .- Service Météorologique de La Réunion

- [13] DIRECTION DEPARTEMENTALE DE L'EQUIPEMENT (1967-1971) .- Tableau des débits journaliers des principales rivières du département - St-Denis, La Réunion
- [14] ERHARD-CASSEGRAIN A. et MARGAT J. (1983) .- Introduction à l'économie générale de l'eau .- Masson, Paris, 361 p.
- [15] LACROIX A. (1936) .- Le volcan actif de l'île de La Réunion et ses produits .- Gauthier-Villars édit., Paris.
- [16] LE GOURIERES D. (1961) .- Hydrologie superficielle de La Réunion - Caractères généraux .- O.R.S.T.O.M., 5 vol.
- [17] NATIVEL P. (1978) .- Volcans de La Réunion - Pétrologie, faciès zéolite, sublimés .- Thèse d'Etat, Orsay.
- [18] RANCON J.Ph. (1982) .- Contribution à l'étude des minéralisations hydrothermales liées à un système géothermique récent dans l'île de La Réunion .- Thèse 3ème cycle, Université de Paris-Sud (Orsay)
- [19] RIVALS P. (1950) .- Histoire géologique de l'île de La Réunion .- Thèse, Sorbonne.
- [20] ROBERT D. (1980)..- Inventaire et analyse systématiques des différents ensembles d'intrusions volcaniques (dykes et sills) de l'île de La Réunion .- Rapport B.R.G.M. 80 SGN 532 GTH
- [21] ROUSSET Ph. (1983) .- Inventaire des puits et points d'eau sensibles à la pollution, utilisés pour l'adduction en eau potable .- Rapport B.R.G.M. 82 REU 33
- [22] STEENHOUDT M. (1979-1983) .- Programme départemental d'études des ressources en eau pour l'aménagement des Hauts de La Réunion .- Rapports B.R.G.M. SGR/REUNION
- [23] STEENHOUDT M. (1980) .- Synthèse hydrogéologique de la plaine des Galets .- Rapport B.R.G.M. 80 REU 18
- [24] STIELTJES L. et LOPOUKHINE M. (1978) .- Evaluation du potentiel géothermique de l'île de La Réunion - 1re phase exploratoire : géologie et géochimie des eaux .- Rapport B.R.G.M. 78 SGN 467 GTH

- [25] STIELTJES L., RANCON J.Ph., ROBERT D. (1979) .- Evaluation du potentiel géothermique de l'île de La Réunion - 2me phase exploratoire : annexes géologiques .- Rapport B.R.G.M. 79 SGN 538 GTH
- [26] TOUCHEBOEUF de LUSIGNY P. et LE GOURRIERES D. (1964) .- Hydrogéologie souterraine de La Réunion - Exposé des résultats obtenus par la mission hydrologique de l'O.R.S.T.O.M. .- 1959-1961, 105 p.
- [27] UPTON B.G.J., WADSWORTH W.J. (1965) .- Geology of Reunion Island, Indian Ocean Nature .- Lond. 207, pp. 151-154
- [28] UPTON B.G.J., WADSWORTH W.J. (1966) .- The basalts of Reunion Island, Indian Ocean .- Bull. Volcanol., 29, pp. 7-24
- [29] UPTON B.G.J., WADSWORTH W.J. (1972a) .- Aspects of magmatic evolution on Reunion Island .- Phil. Trans. R. Soc. London, A, 271, pp. 105-130
- [30] BARGEAS A. (1982) .-Inventaire des données concernant les facteurs hydro-climatologiques relevés sur l'île de La Réunion jusqu'à juillet 1982 - Rapport BRGM 82 REU 02

ANNEXES

ANNEXE I.1 - Postes pluviométriques gérés par le Service Météorologique de la Réunion - indice de classement météo et période de fonctionnement.

• Pluviographes

Indice	Nom du poste	Période de fonctionnement (année d'ouverture et éventuellement de fermeture de poste)
202 [*]	La Grande Chaloupe	1972 -
213	Les Brises	1969 à 1971
214 [*]	St Denis/ville	1951 -
215	La Providence	1964 -
223	Mât de Vigie	1959 à 1967
224 [*]	Le Chaudron	1967 -
225 [*]	La Mare	1951 -
226	La Convenance	1952 -
233	La Montagne/Ville	1952 -
234	St François	1953 -
235 [*]	Gillot	1952 -
236	Le Grand Hazier	1953 -
237	Ste Suzanne	1953 à 1967
243	La Montagne PK 13	1953 à 1971
245	Rivière des Pluies	1953 à 1969
246	Bel Air Ste Suzanne	1957 -
247	Marancourt	1967 à 1971
248	Bois Rouge	1952 -
253	Brûlé Val Fleuri	1956 -
254	Brûlé ONP	1952 -
255	Flacourt	1953 -
256	Beaufonds Ste Marie	1958 -
257	Trois Frères	1953 -
258	Etang Cambuston	1971 -
260	Le Port M.N.	1974 -
261 [*]	Le Port	1951 -
262	La Possession	1953 -
265	Bois Court-Ste Marie	1958 -
266	Bagatelle	1953 -
267	La Renaissance	1953 à 1977
268	Quartier Français	1957 -
271	Nouvelle Terre	1966 -
272	Possession Aérod.	1966 à 1976
275	Moka	1967 -
277	Deux Rives	1952 à 1970
278	Le Colosse	1957 -
279	St André Terre Rouge	1965 -
281	Cambaie	1970 à 1973
282	Rivière des Galets	1967 à 1970
286	Beaumont les Hauts	1969 à 1970

287 [*]	Menciol	1953 -
288	Ravine Creuse	1953 à 1970
291 [*]	Savannah	1953 -
292 [*]	Dos d'Ane	1966 -
298	Rivière du Mât U.S.	1952 à 1977
302 [*]	Bois de Néfles St Paul	1952
308	Rivière du Mât/ Quartier Français	1957 à 1967
313	Aurère	1951 -
318	Beauvallon	1952 -
320	Bernica	1960 -
323 [*]	Aurère II	1981 -
328	Beaulieu	1952 à 1970
330	Eperon	1953 -
331	Le Guillaume	1951 à 1979
332	Petite France	1962 -
333 [*]	Piton Maïdo	1976 -
334 [*]	Grand Ilet	1973 -
336	Mare à Poule d'Eau	1966 -
338	Melissa	1968 -
339	St Benoît	1950 -
340	St Gilles Les Hauts	1953 à 1974
342	Forêt Bénard	1956 à 1971
345 [*]	Hell Bourg	1950 -
346	Bélouve	1955 -
348 [*]	Grand Bras Abondance	1965 à 1977
349	Beaufond - St Benoît	1952 -
350	St Gilles Les Bains	1956 -
351	Tan Rouge	1960 -
352 [*]	Palmiste Guillaume	1953 -
357 [*]	Takamaka PK 12	1971 -
358	Grand Etang	1968 à 1971
359	Confiance	1968 à 1970
360	Vue Belle	1953 -
363	La Nouvelle	1970 -
367	Takamaka Usine	1968 -
369	Cambourg	1958 -
377	Takamaka	1953 à 1969
379	Rivière de l'Est	1953 -
381	Trois Bassins	1951 -
389	Hauts de Ste Rose	1973 -
391 [*]	Colimaçons	1961 -
394 [*]	Cilaos	1951 -
396	Bébourg	1961 -
397 [*]	Plaine des Palmistes	1951 -
399	Piton Ste Rose	1950 à 1977

402*	Carreau Alfred	1970 -	507	Grand Coude II	1978 -
403	Ilet à Cordes	1964 à 1971	509	Le Tremblet	1953 -
404	Mare sèche Cilaos	1966 à 1971	513	Pierrefonds	1953 -
406*	Piton Tortue	1966 -	514	Ligne Paradis	1966 -
407	Petite Plaine	1967 -	515	Mon Caprice	1953 -
408	Rivière de l'Est/EER	1970 à 1973	518*	Grand Galet	1953 -
411	Chaloupe St Leu	1953 -	525	Bassin Martin	1952 à 1969
413	Ilet à Cordes II	1977 -	526	Bassin Plat	1973 -
420	St Leu	1950 -	528	La Crête	1968 -
421	Stella Cap	1953 -	534	Fredeline	1964 à 1970
424	Palmiste Rouge	1962 -	535	Bérive	1964 à 1972
431	Piton Pépinière	1953 à 1972	536	Monvert	1951 -
435	Grand Bassin	1960 à 1971	537	Plaine des Grègues	1968 -
436	Bois Court/Plaine des Cafres	1960 à 1971	544*	St Pierre	1947 -
439	Bois Blanc	1952	546	Les Lianes II	1980 -
440	Pointe au Sel	1962 à 1970	547	Les Lianes	1968 -
441	Stella Court	1953 -	549	St Philippe	1951 -
442	Le Plate	1953 -	555	Grand Bois	1953 -
443	Pavillon	1960 à 1970	557*	St Joseph (Gendarmerie)	1960 -
445*	Bras Sec/Plaine des Cafres	1959 -	558	Vincendo	1968 -
446*	Plaine des Cafres	1948 -	559*	St Philippe II	1951 -
447	Ferme Isautier	1967 à 1972	568	Langevin	1968 -
451	Stella Portail	1953	577	St Joseph C.A.R.	1954
452	Tévelave	1953 -	600	L'Alouette	1968 -
453*	Plaine des Makes	1958 -	601	La Ressource	1966 -
457	Grande Ferme	1964 -	602	Ravine des Citrons	1967 -
458*	Gîte de Bellecombe	1966 -	603	Serre Entre Deux	1966 -
461	Piton Cour St Leu	1953 à 1972	607*	Nez de Boeuf PK 8	1967 -
463	Bellevue les Hauts	1961 -	609*	Grand Pays	1966 -
464	Bras Long	1966 -	610	Defriche Aloes	1960 à 1969
465	Bras d'Antoine	1961 -	611	Parc à Boeufs	1960 à 1969
466	Pont d'Yves	1977 -	612	Moulin Cader	1960 à 1969
468	Pas des Sables	1968 à 1971	613	Route Hubert de Lisle Vue Belle Les Hauts	1961 -
472	Les Avirons	1952 -	614	Bel Air St Louis	1961 -
473	Belle Vue les Bas	1952 -	615	Bois de Néfles St Louis	1961 -
474	Entre Deux	1953 à 1977	616	Bon accueil St Louis	1967 à 1979
477	Notre Dame de la Paix	1968 à 1979	617	Cocos - St Louis	1962
478*	Le volcan Bory	1966 à 1977	618	Pont Mathurin	1961 -
482	Etang Salé	1956 -	619	Sables St Louis	1961 -
483	Maison Rouge	1961 -	620	Cap Blanc Grand Galet	1963 -
484	Rivière St Louis	1966 -	621*	Commerson	1968 -
485*	Tampon PK 13	1958 -	623	Mon Repos/St Pierre	1966 -
488*	Foc-Foc	1966 -	625	Roche Plate Coop.	1968
492	Etang Salé les Hauts	1953 -	626	Piton Défaud	1967 -
493	Le Gol	1953 -	628*	Chisny	1968 -
494	Ravine des Cabria	1953 -	632	Piton Pépinière 2	1973 -
497	Grand Coude	1967 -	633	Piton St Leu 2	1972 -
498	Cap Blanc	1953 à 1968	634	Bérive	1972 -
503	St Louis	1960 -	635	La Renaissance 2	1975 -
505	Tampon Ville	1951 -	636*	Piton Rouge	1975 -

2me PARTIE

EVALUATION DES APPORTS EN EAU

REPARTITION MENSUELLE DE LA PLUIE SUR L'ENSEMBLE DE L'ILE

(Période 1971-1981)

Paramètre climatique mesuré en de nombreux postes (130), la pluie est extrêmement variable à La Réunion. Avant de chercher une méthode permettant d'affecter une valeur en chaque maille à partir des valeurs aux stations, il convient tout d'abord de tenter de décrire la variabilité de ce paramètre à partir d'un échantillonnage aussi complet que possible. Celui-ci étant obtenu par le compromis entre une couverture spatiale assez homogène de l'ensemble de l'île par les stations retenues et le fait d'avoir suffisamment de valeurs simultanées à toutes les stations.

Après avoir estimé les valeurs manquantes aux stations sélectionnées pour la suite de l'étude, nous étudions la répartition spatiale des pluies en fonction de l'exposition aux vents dominants, de l'altitude.

Il n'apparaît pas de relation globale permettant de décrire cette répartition des pluies ; nous utilisons alors une analyse en composante principale des données disponibles, en considérant les stations comme variables et les pas de temps comme observations.

Nous montrons notamment comment le fait de définir préalablement à cette analyse, un indice d'abondance relative de chaque station par rapport aux autres pour chaque pas de temps (opération de profilage), permet d'interpréter plus facilement les résultats de cette analyse et de dégager 5 régimes différents dans la répartition des pluies à La Réunion.

La bonne homogénéité spatiale des composantes principales nous incite alors à utiliser les résultats de cette analyse en composantes principales comme support à l'extension des valeurs en chaque maille de l'île.

1. CRITIQUE DES DONNEES

Nous avons éliminé les stations n'ayant pas ou que peu fonctionné sur la période considérée 1971-1981, ou déclarées comme suspectes par le Service Météorologique de La Réunion. Après cette première sélection, il restait 123 postes que nous avons classé selon leur nombre de lacunes en 6 groupes (fig. II.1a) :

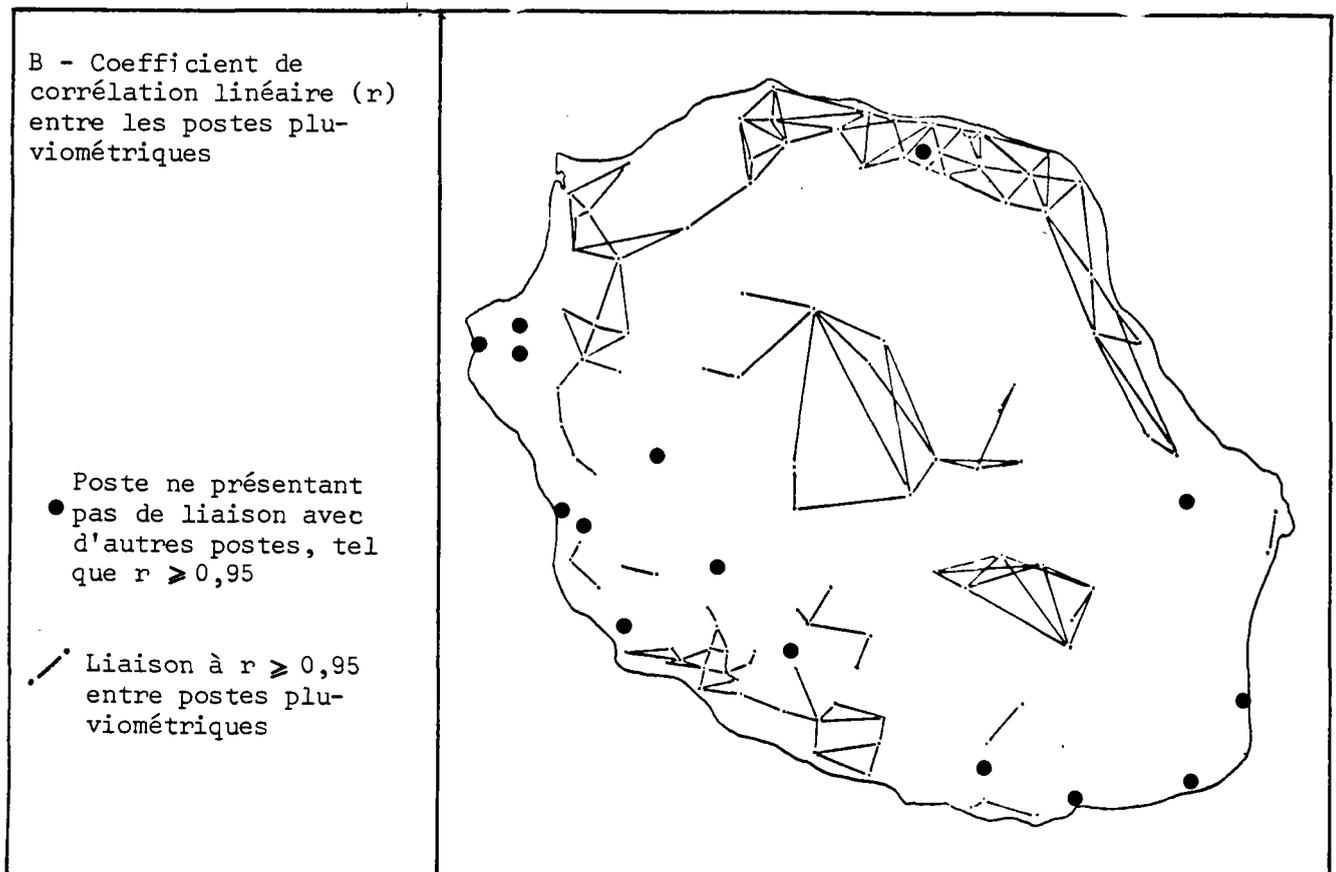
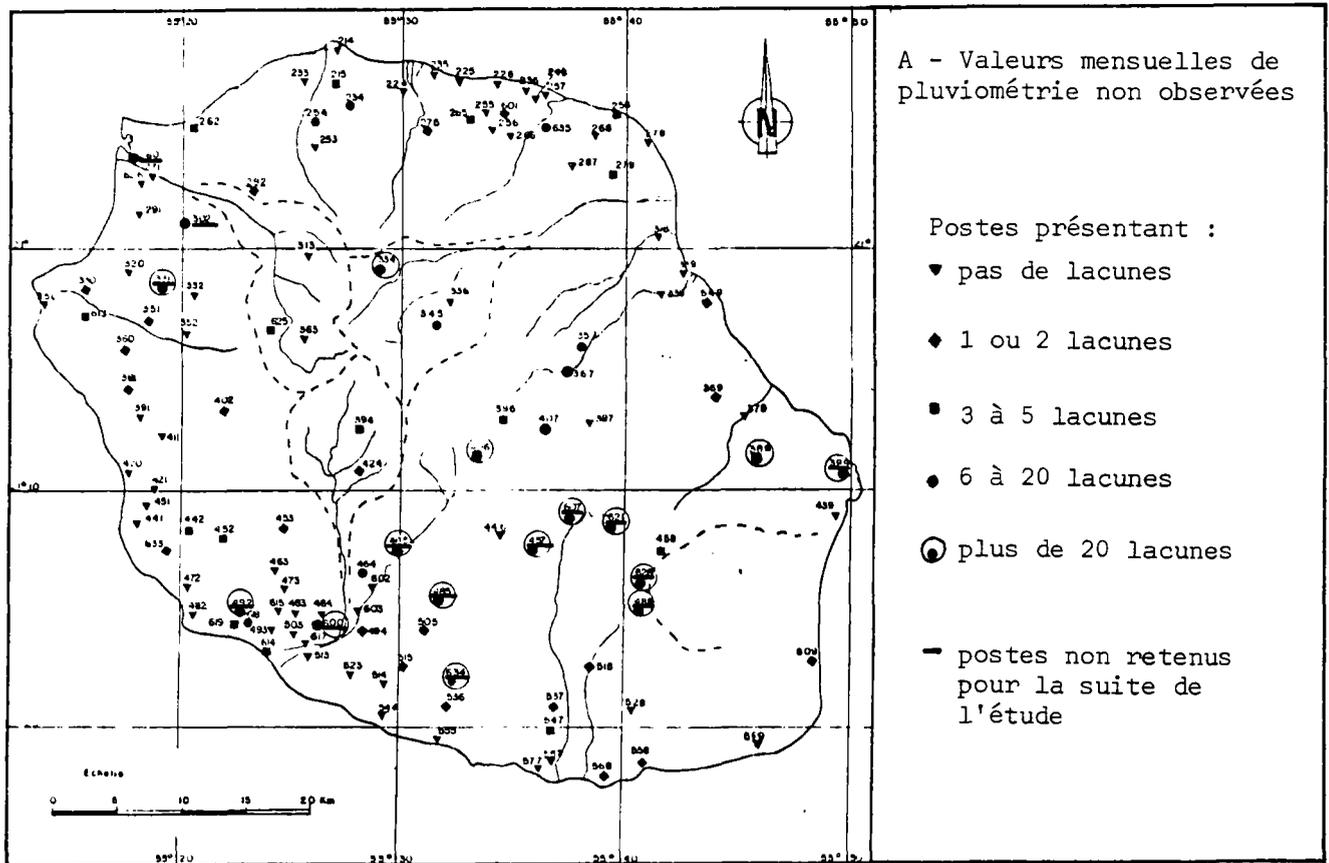
- (1) 58 stations à enregistrements complets sur la période 1971-1981,
- (2) 21 stations n'ayant qu'une à deux lacunes,
- (3) 14 stations ayant 3, 4 ou 5 lacunes,
- (4) 10 stations ayant 6 à 10 lacunes,
- (5) 5 stations ayant 10 à 20 lacunes,
- (6) 15 stations ayant plus de 20 lacunes.

Les stations présentant de nombreuses lacunes n'ont pas fonctionné durant toute la période 1971-1981, le plus souvent il s'agit de stations mises en place après 1971.

Dans l'optique d'une analyse en composantes principales, on doit travailler sur des séries complètes de valeurs (une lacune d'un mois sur une seule station fait éliminer ce mois donné pour l'analyse). En travaillant sur ces valeurs brutes, soit on se limite aux enregistrements complets pour considérer l'ensemble de la période, mais la couverture de l'île ainsi réalisée est très imparfaite, soit on élimine les mois incomplets en augmentant le nombre de stations (les lacunes étant rarement synchrones même en se limitant à 2 lacunes par stations, on ne considère plus que 110 mois pour 79 stations et 80 mois si l'on accepte les stations ayant jusqu'à 5 lacunes).

Or les régions à pluviométrie élevée (Rivière des Marsouins, Piton de la Fournaise) sont celles où les lacunes de mesures sont importantes. Pour éviter d'ignorer ces régions pour une étude globale de la pluviométrie de l'île, tout en utilisant une période suffisante, nous avons évalué les valeurs manquantes d'une station à partir des valeurs de stations voisines afin d'obtenir des séries complètes reconstituées, ce qui introduit naturellement un biais qui peut cependant être considéré comme léger dans la plupart des cas (coefficients de corrélation élevés entre les stations, nombre de lacune restreint). L'étude de ces coefficients de corrélation permet en outre de détecter des stations suspectes (poste 255 isolé dans le secteur N.E.) (fig. II.1b).

FIG. II.1 - Nombre de lacunes sur les hauteurs mensuelles de pluies aux postes pluviométriques et relation linéaire entre les stations sur la période 1971-1981



2. ESTIMATION POUR LES VALEURS MANQUANTES

Nous préférons utiliser les régressions multiples qui permettent de prendre en compte simultanément les hauteurs de pluies en différentes stations, si possible encadrant géographiquement la station présentant des lacunes de mesures, plutôt que de simples régressions linéaires (annexe II.1).

En effet, dans un premier temps, nous avons utilisé les résultats de régressions linéaires simples entre deux postes voisins. Il s'est avéré que certains mois n'obéissaient pas à la relation globale entre ces postes définie par l'équation de régression. Nous en sommes venus à considérer simultanément les résultats de plusieurs régressions linéaires et d'employer une méthode graphique d'interpolation qui ne s'est cependant pas avérée satisfaisante dans tous les cas.

Pour définir l'équation de régression multiple, les stations explicatives sont choisies dans le voisinage de la station à expliquer ; outre leur proximité, on tient compte de leur propre nombre de lacunes et de leur coefficient de corrélation linéaire vis à vis de la station à expliquer.

La multiplication des stations explicatives n'apparaît pas souhaitable le plus souvent : si le coefficient de corrélation totale est légèrement plus élevé, les restitutions n'apparaissent pas plus fiables, et de plus on augmente ainsi le risque d'obtenir chez les stations explicatives une lacune synchrone de celles de la station à expliquer ; dans ce cas, on utilise les résultats de régressions linéaires simples (les lacunes à la station de Cilaos ont été approchées à partir de la régression linéaire définie à partir de l'autre station du cirque de Cilaos : Palmiste Rouge).

Les dépressions tropicales ayant un caractère saisonnier, nous avons séparé la saison "humide" soumise à ces dépressions de la saison "sèche" et testé les régressions multiples à partir de ces valeurs semestrielles. Les premiers résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus à partir de l'échantillon complet (11 années entières). Nous n'avons pas poursuivi dans cette voie qui n'améliore pas la précision de l'estimation.

Des 123 postes sélectionnés, nous n'en retenons que 109 (fig. II.1a) en éliminant notamment les postes présentant un pourcentage de lacunes supérieur à 10 %, exception faite toutefois pour les postes relativement isolés ou présentant des caractéristiques pluviométriques exceptionnelles (nous reconstituons ainsi 49 valeurs au poste des Hauts de Ste-Rose car celui-ci représente le pôle de pluviométrie maximale à La Réunion. On perdrait une information importante en l'éliminant et nous préférons le considérer malgré une précision assez faible sur plus de 30 % des valeurs).

Au départ, nous avons fixé cette limite à 20 %, mais en fait, les lacunes des postes pris en compte ne peuvent être approchées de manière satisfaisante (exemple : postes du Piton de la Fournaise) ou alors ces postes sont situés dans des zones où l'information est déjà assez dense (Le Port, Bois de Nèfle St-Paul sur le littoral N.O. où existent par ailleurs de nombreux postes à enregistrements complets).

3. REPARTITION SPATIALE DES PLUIES A LA REUNION

Toute démarche d'interpolation ou de cartographie des hauteurs de précipitations doit reposer si possible sur une bonne compréhension de leur répartition spatiale. Nous allons tout d'abord examiner l'influence de différents paramètres physiques sur cette répartition. En effet, la carte des isohyètes moyennes interannuelles réalisée par le Service Météorologique de La Réunion (fig. II.2) montre l'opposition manifeste et typique de ce type d'île entre la côte "au vent" et la côte "sous le vent" ; la ligne de crêtes passant par les deux volcans crée une barrière aux vents dominants (les alizés du S.E.). Ces reliefs ont une importance prépondérante sur la répartition de la pluviométrie.

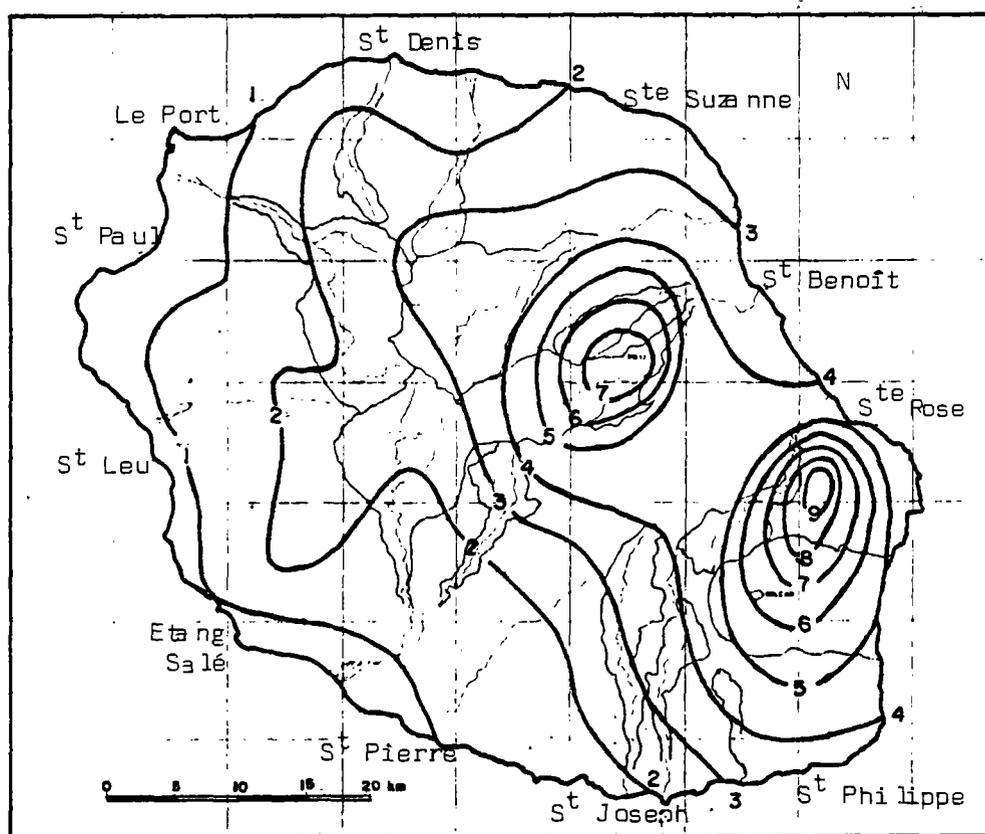


FIG. II.2 - Isohyètes moyennes interannuelles en mètres à la Réunion.- Période 1951-1980 (d'après le Service Météorologique de La Réunion)

3.1. Exposition aux vents dominants

Nous avons choisi d'étudier cette évolution le long du profil St-Benoit - St-Pierre, passant par les "hautes plaines" entre les deux volcans, la ligne de crête est ici unique (contrairement aux cirques) et nous disposons d'un bon nombre de postes assez régulièrement répartis (annexe II.2).

La comparaison des profils pluviométriques moyens (janvier, septembre et année) et du profil topographique (fig. II.3) montre bien :

- la différence très nette de pluviométrie entre les deux façades de l'île avec une côte "au vent" très arrosée (hauteur de pluie supérieure à 3,5 m) et une côte "sous le vent" plus sèche (hauteur de pluie inférieure à 2,3 m) ;
- l'altitude influence fortement la pluviométrie, mais il n'y a pas de linéarité de la relation notamment sur la côte au vent ; l'optimum pluviométrique ne correspond pas à la ligne de crête topographique.

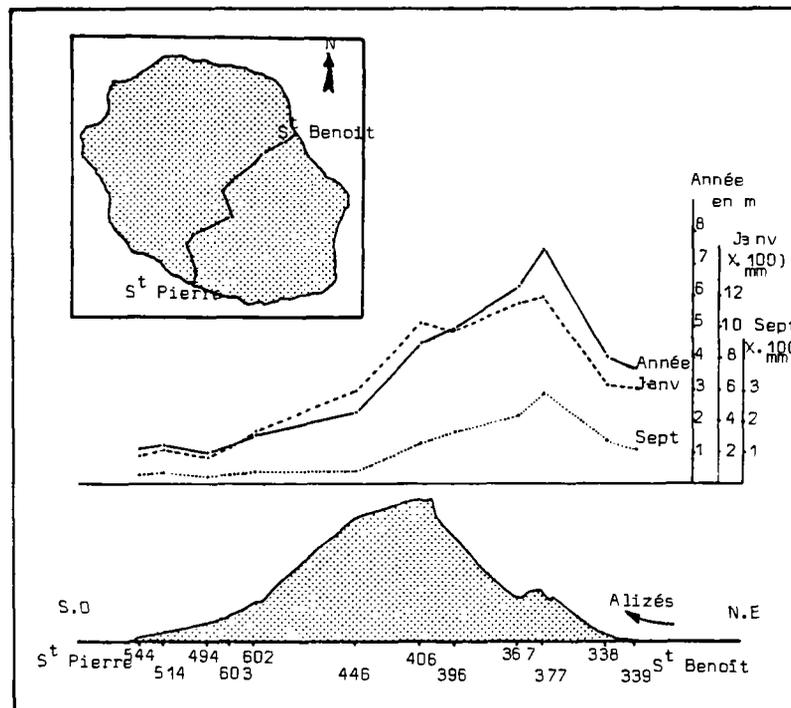


FIG. II.3 - Evolution des hauteurs moyennes de pluies, le long du profil St-Benoit - St-Pierre

Sur ce profil, le maximum de précipitation correspond au poste de Takamaka nettement plus pluvieux que les postes plus élevés de Bebourg et Piton Tortue.

Postes	Altitude	Hauteur moyenne interannuelle de pluie
Takamaka	650 m	7486,7 mm
Bebourg	1335 m	4973,9 mm
Piton Tortue	1800 m	4488,7 mm

Cette répartition varie peu au cours de l'année ; l'écart est cependant plus net pendant la saison froide qui est très sèche sur la côte sous le vent, moins de 50 mm de pluie en moyenne pour le mois de septembre. En janvier, il pleut presque autant sur le sommet de la crête (Piton Tortue, 1029 mm) qu'à mi-pente (Takamaka, 1184 mm).

La non-correspondance des maxima topographiques et pluviométriques est un phénomène déjà bien connu :

- la carte de la pluviométrie moyenne interannuelle (fig. II.2) montre que les pôles de pluviométrie maximum ne correspondent pas aux sommets de l'île, mais aux pentes moyennes de la côte au vent ;
- Toucheboeuf de Lusigny [11] citait déjà ces observations : "La pluviométrie dépend en premier lieu de l'exposition aux vents d'alizés.... la pluviométrie est également fonction de l'altitude ; d'une manière générale, elle croît avec l'altitude pour atteindre un maximum entre 800 m et 1400 m. Au delà, la pluviosité commence à décroître d'une façon surtout sensible à partir de 1800 m..."

Il ne s'agit pas non plus d'un phénomène typique de La Réunion mais au contraire d'un phénomène très général en régions montagneuses intertropicales. Confrontant différentes études réalisées en Amérique du Sud et en Afrique, Danielle Janoueix-Yacono [5] constate que les maxima pluviométriques des façades montagneuses tournées vers l'océan se situent sur les piémonts et bas de pente. L'humidité relative (> 75 %) est telle qu'un faible mouvement ascendant (détente et refroidissement de l'air) provoque les précipitations.

La comparaison du cadre géographique des stations siège des hauteurs de précipitations moyennes interannuelles maximales de La Réunion (Hauts de Ste-Rose et Takamaka) et de la station de la Plaine des Palmistes (située sur l'axe médian entre les deux précédentes) semble indiquer que c'est l'ascendance rapide des masses d'air humides qui serait à l'origine des précipitations importantes.

Postes	Hauteur de pluie moyenne interannuelle (en mm)	Altitude (en m)	Distance à la côte (en km)
Hauts de Ste-Rose	9 961	860	6
Takamaka	7 437	649	10
Plaine des Palmistes	4 549	964	15

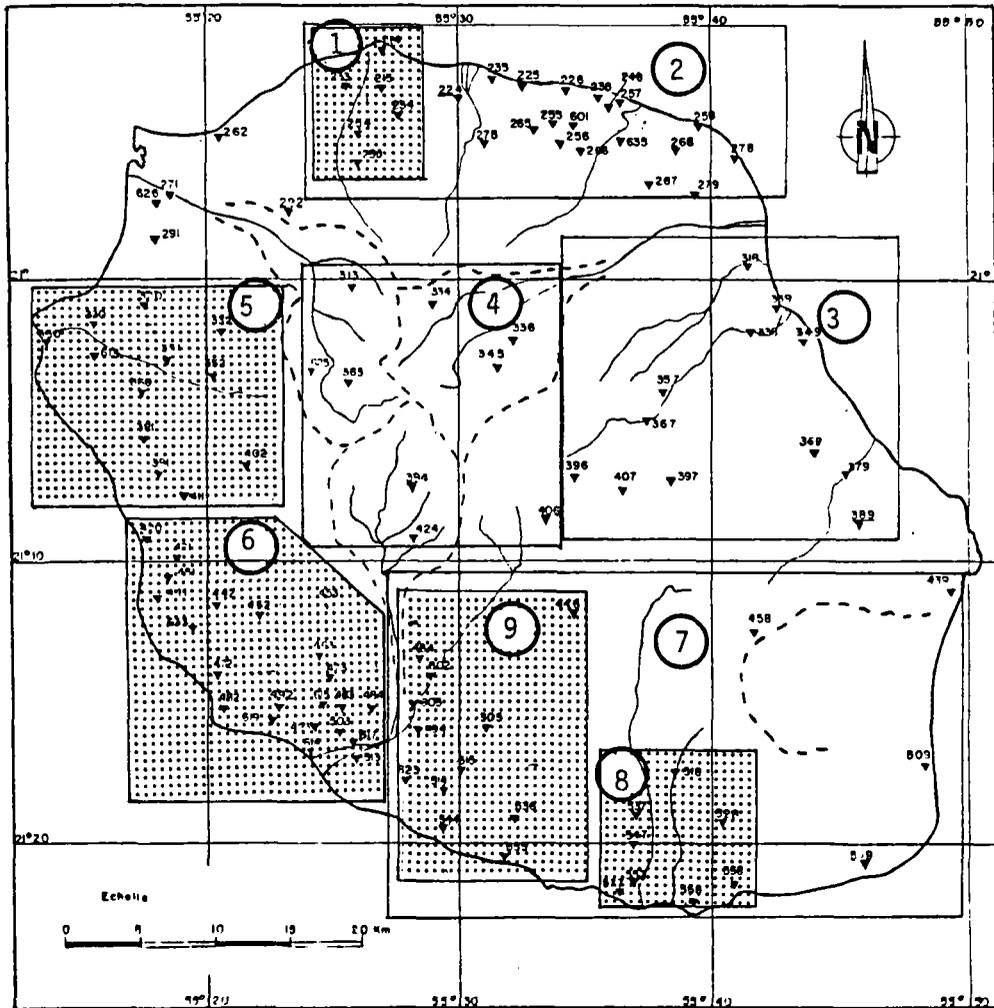
La lacune relative de postes en altitude ne permet pas de situer plus précisément cet optimum pluviométrique à La Réunion.

3.2. Relations avec l'altitude

Le fait que les postes de hauteurs de pluie maximum soient à mi-pente sur la côte "au vent" est un facteur défavorable à l'obtention d'une relation globale entre la hauteur de précipitation et l'altitude.

Nous avons cependant voulu étudier cette relation et suivre son évolution à pas de temps mensuel, sur l'ensemble de l'île, puis sur des secteurs géographiques limités (annexe II.3).

En résumé, on s'aperçoit que l'altitude joue sur de petits secteurs géographiquement homogènes (Hauts de St-Denis, Hauts de St-Joseph, secteur Sud-Ouest de St-Leu, St-Louis, Plaine des Makes) un rôle prépondérant dans la répartition des pluies (fig. II.4). Mais sur d'autres secteurs et sur l'ensemble de l'île, cette relation n'est en fait satisfaisante que quelques mois dans l'année (mois de saison humide : où sous l'emprise de dépressions tropicales, l'île de La Réunion est soumise à des pluies intéressantes en général l'ensemble de l'île).



Secteur ou la relation linéaire entre la hauteur de pluie mensuelle et l'altitude présente un coef. de corrélation > 0.8

FIG. II.4 - Etude sectorielle de la relation entre les hauteurs de pluie mensuelle et l'altitude.

Dans le cas de coefficient de corrélation assez élevé, le gradient pluviométrique moyen est de l'ordre de 400 mm/100 m, mais il peut atteindre 170 mm/100 (cyclone Hyacinthe) ou être très faible, voire négatif.

L'altitude ne peut jouer un rôle global dans l'extension géographique des données.

4. APPORT DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES COMME GUIDE D'INTERPRETATION CLIMATIQUE

Les facteurs géographiques (exposition au vent dominant, altitude), bien qu'intervenant de manière prépondérante dans la répartition des pluies ne suffisent pas à expliquer toute la variabilité de ce phénomène. Pour tenter de mieux l'appréhender, nous avons recours à l'analyse en composantes principales (A.C.P.).

4.1. Généralités

L'analyse en composantes principales est l'une des plus simples et des plus utilisées des analyses statistiques multidimensionnelles [6 et 7]. Son but est de décrire sous forme résumée la variabilité d'un ensemble de points, ici constitués de 109 variables (les stations pluviométriques) ayant chacune 132 observations (les valeurs mensuelles). Cet ensemble peut s'identifier à un espace à 109 dimensions ; il est concevable que l'ensemble des points de cet espace s'organise autour de "directions privilégiées" car les variables ne sont pas linéairement indépendantes.

Or les composantes principales sont les axes, exprimés comme combinaisons linéaires indépendantes des variables, par rapport auxquels l'inertie du nuage de points (sa variance) est maximale.

Le calcul de ces composantes se ramène à celui des valeurs propres et vecteurs propres de la matrice de covariance ou de corrélation (variables réduites).

Les vecteurs propres sont en fait les "directions privilégiées" évoquées précédemment, la projection des 132 observations sur le premier vecteur propre donne 132 points dont la dispersion est maximum.

Ce calcul des vecteurs et valeurs propres s'effectue progressivement, chaque composante expliquant moins de variance que la précédente.

Les observations décrites initialement dans l'espace des variables peuvent ainsi se représenter également dans l'espace des axes principaux, le principal intérêt étant bien sûr de se limiter à quelques

composantes expliquant une proportion satisfaisante de la variabilité totale des variables d'origine en résumant ainsi une information décrite de façon très redondante par les variables initiales.

Les facteurs limitants d'une telle recherche de composantes principales sont :

- un nombre maximal de composantes (dans un but de représentation graphique),
- un pourcentage minimal de la variance totale expliquée assurant la stabilité et souvent l'interprétabilité des composantes (l'analyse sera d'autant plus satisfaisante que ce nombre sera élevé).

A La Réunion, les saisons sont bien marquées et les pluies très abondantes sont en général liées aux dépressions cycloniques qui intéressent l'ensemble de l'île. En conséquence, il existe des mois "secs" et des mois "pluvieux". En raisonnant toujours sur la moyenne des 109 stations retenues (fig. II.5), on observe en général un rapport de 1 à 10 entre les pluies de septembre-octobre et de janvier qui peut dépasser 1 à 100 si l'on observe deux mois précis :

- novembre 1973 10.6 mm
- janvier 1980 1792 mm

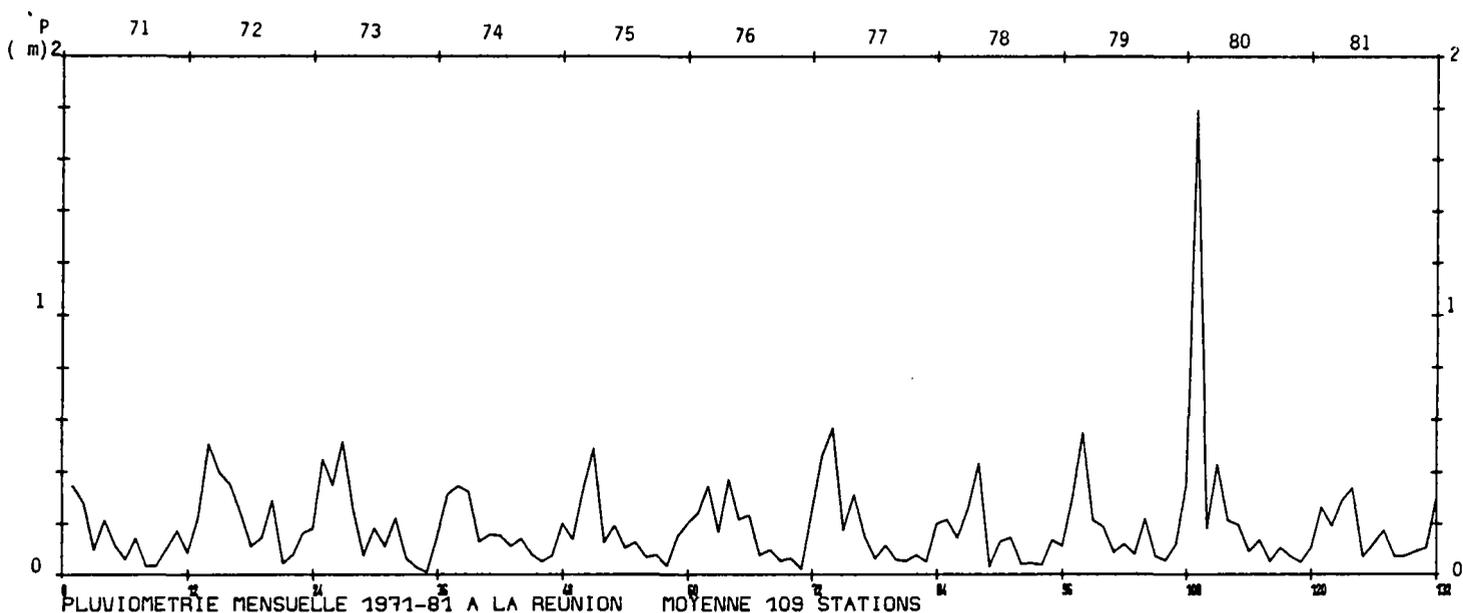


FIG. II.5 - Hauteur de pluie mensuelle à La Réunion - Période 1971-1982
Valeurs moyennes des 109 stations retenues

Si l'on travaille sur les observations brutes, la première composante va représenter uniquement cet effet d'abondance saisonnière qui constitue un pourcentage très important de la variabilité globale de la pluviométrie. Cette composante va alors masquer les autres composantes (un test sur 10 stations dont les valeurs ont pourtant été transformées en racines carrées -pour réduire l'influence des fortes valeurs-, aboutit à une première composante expliquant 93 % de la variance avec laquelle toutes les variables sont fortement corrélées -coefficient de corrélation allant de 0.922 à 0.999). Nous choisissons donc de travailler sur des observations profilées centrées réduites.

$$P_{pm,s} = \frac{P_{m,s}}{\overline{P}_m}$$

avec
$$\overline{P}_m = \frac{1}{109} \sum_i P_{mi}$$

la pluie profilée du mois m à la station s ($P_{pm,s}$) = pluie du mois m à la station s (P_{ms}) divisée par la moyenne des pluies du mois m à toutes les stations (\overline{P}_m):

Cette transformation laisse subsister un important contraste entre les stations : les stations situées en zone peu pluvieuse (côte sous le vent) ont en général des valeurs profilées inférieures à l'unité, celles situées en zone pluvieuse (côte au vent) des valeurs supérieures à l'unité.

Pour s'affranchir de ces différences, on fait intervenir la moyenne (\overline{P}_{ps}) et l'écart-type associé des valeurs profilées en chaque station (σP_{ps}).

Nous obtenons ainsi des pluies profilées centrées réduites U_{ms} (valeur profilée moins profil moyen) divisées par l'écart-type :

$$U_{m,s} = \frac{P_{pm,s} - \overline{P}_{ps}}{\sigma P_{ps}}$$

Cette transformation limite la dispersion des valeurs entre stations "pluvieuses" et stations "sèches" et entre mois pluvieux et mois secs, comme le montre le tableau ci-dessous.

TABLEAU II.1 - Evolution comparée des maxima et des minima des observations en passant des valeurs brutes aux valeurs profilées centrées réduites pour une station de zone pluvieuse et une de zone sèche

Stations	Valeur mensuelle	Pluie	Pluie profilée	Pluie profilée centrée	Pluie profilée centrée réduite
"pluvieuse" Takamaka (357 m)	maximale	4668.5	7.28	4.96	5.44
	minimale	34	0.99	-1.33	-1.46
"sèche" St-Gilles (350 m)	maximale	933	1.44	+0.88	1.95
	minimale	0	0	-0.56	-1.24

Par ce procédé, on a donc :

- éliminé l'essentiel des fluctuations saisonnières intéressant l'ensemble de l'île,
- ramené les données de toutes les stations à une succession d'indices d'abondance relative d'un mois donné par rapport à son abondance moyenne.

Le fait de profiler se répercute surtout sur la distribution mensuelle des valeurs (après profilage, les valeurs mensuelles d'une station ne sont plus comparables entre elles en valeurs absolues, elles le sont relativement à la moyenne établie à partir des 109 stations). C'est ainsi que l'allure générale de la distribution mensuelle de ces valeurs peut être inversée : la saison sèche apparaissant ainsi "plus pluvieuse" que la saison humide. (exemple : station de St-Philippe) (fig. II.6b).

Centrer ces variables revient à ramener les valeurs autour de zéro. Réduire ces valeurs, c'est les diviser par l'écart-type. Ces deux opérations ramènent toutes les variables sur un même ordre de grandeur, mais ne modifient pas l'allure générale de la distribution mensuelle qui apparaît sur les valeurs profilées.

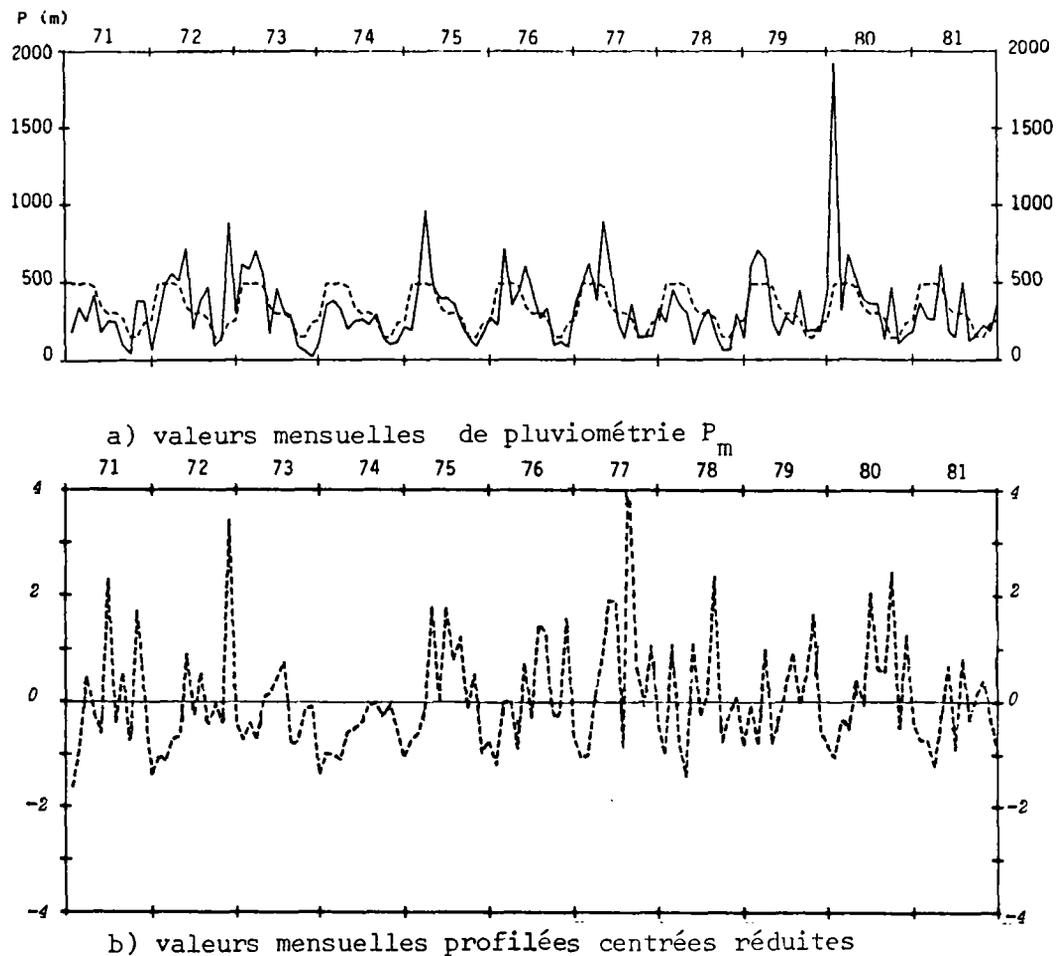


FIG. II.6 - Valeurs mensuelles et mensuelles profilées centrées réduites des hauteurs de pluie à la station de S^t Philippe période 1971-1981

C'est en fait cette distribution mensuelle qui différencie les variables les unes des autres.

Nous avons choisi d'effectuer la recherche de 4 composantes.

4.2. Analyse des valeurs profilées à La Réunion

La variance totale expliquée par ces 4 composantes est de 65 % (32,2 % ; 19,9 % ; 7,1 % ; 5,9 % successivement pour les 4 composantes).

Nous avons cartographié successivement les coefficients de corrélation (r) entre les variables (stations) et chacune des composantes principales, afin de vérifier une certaine homogénéité des résultats (des stations voisines devant avoir des résultats assez semblables) et de dégager des zones éventuelles de comportement homogène ou au contraire très différent.

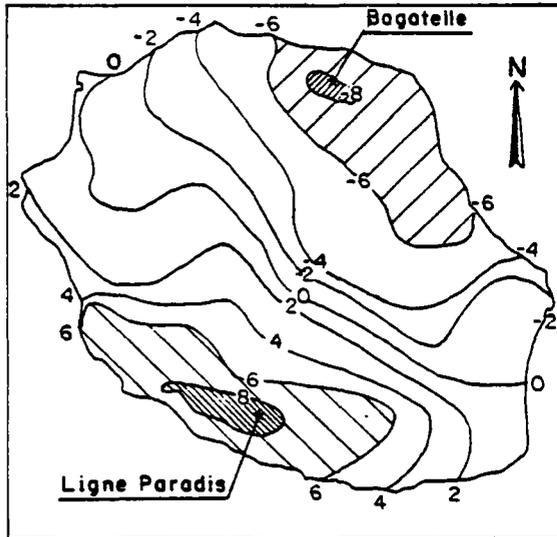
Pour chacune des 4 composantes (surtout les 3 premières), il se dégage un fort contraste entre différentes zones de l'île (fig. II.7a à fig. II.7d).:

- la première composante oppose le N.E. au S.O. avec des pôles respectifs sur les Hauts de Ste-Marie - Ste-Suzanne ($r = -0,8$) et sur les Hauts de St-Pierre - St-Louis ($r = +0,8$) ;
- à l'opposé (c'est somme toute logique) la deuxième composante dénote un comportement très différent entre l'O.NO (secteur de Petite France, $r = +0,6$) et l'E.SE, façade Est du Piton de la Fournaise ($r = -0,6$) ;
- seule la partie centrale est peu corrélée avec les deux premières composantes ; elle l'est plus fortement avec la troisième ($r = -0.843$ à Piton Tortue) la cartographie de ce coefficient de corrélation avec la troisième composante isole la zone des cirques et des hautes plaines se prolongeant vers le littoral Sud St-Pierre - St-Joseph, de tout le reste du littoral ;
- la quatrième composante qui n'explique pas 6 % de la variance totale individualise à peu près les 4 zones apparues sur les deux premières composantes, mais en leur donnant cette fois un comportement homogène deux à deux (pôle positif au N.NE et S.SO, pôle négatif à l'Ouest et à l'Est), le coefficient de corrélation n'atteint cependant que rarement 0,5.:

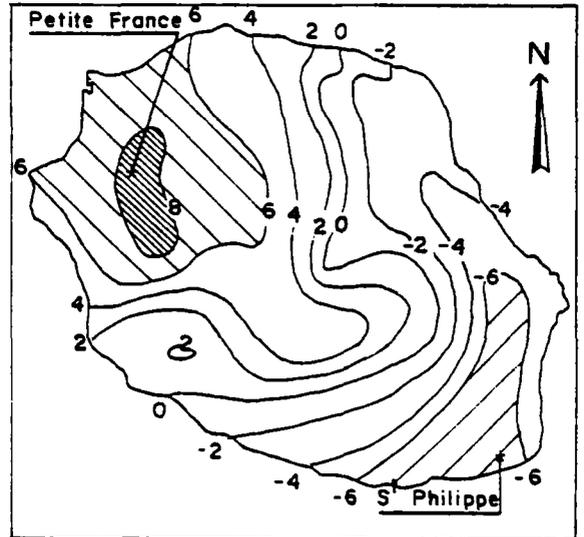
La quatrième composante apporte peu à l'identification de secteurs à comportement homogène, et il est à supposer que la relation deviendrait encore plus floue avec une cinquième composante, voire de nouvelles. Notre choix primitif limitant l'étude à la recherche de 4 composantes principales paraît satisfaisant sur ce premier point.

**FIG.II.7 - ISOVALEURS DES COEFFICIENTS DE CORRELATION (*10)
VIS A VIS DES COMPOSANTES PRINCIPALES**

a - Composante 1 (v e : 32.2 %)



b - Composante 2 (v e : 19.9 %)

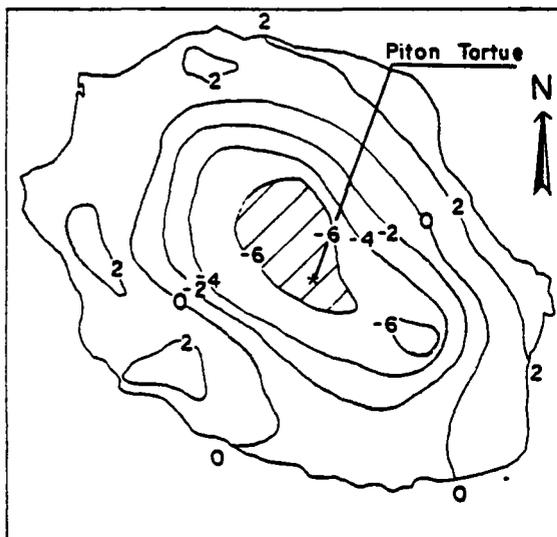


LEGENDE
valeurs des coefficients de corrélation (*10)

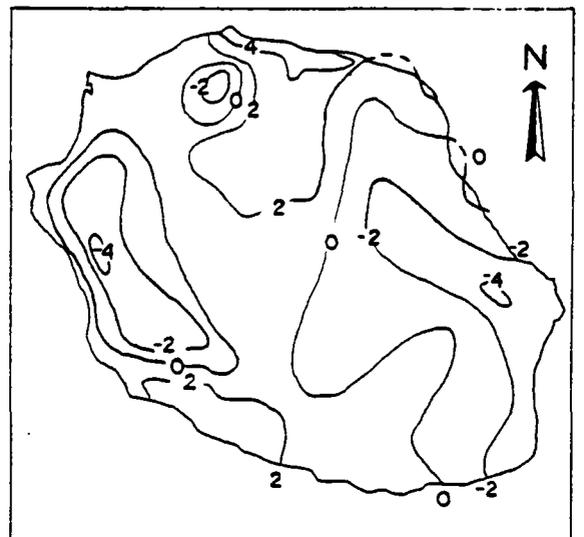
-1 < [diagonal lines /] < -0.8	[diagonal lines \] < 0.6	0.6 < [diagonal lines /] < 0.8	[diagonal lines \] < 1
--------------------------------	--------------------------	--------------------------------	------------------------

* : station retenue v e : variance expliquée

c.- Composante 3 (v e : 7.1 %)



d - Composante 4 (v e : 5.7 %)



A partir des trois premières composantes s'individualisent cinq zones couvrant la majeure partie de l'île présentant une liaison assez élevée avec une de ces trois composantes.

Le découpage de l'île selon chacune des deux premières composantes ne correspond pas à l'opposition habituelle entre "côte au vent" et "côte sous le vent". Nous remarquons cependant que les deux zones à forte corrélation négative vis à vis des deux premières composantes correspondent à celle où le "profil moyen" est supérieur à 1 (zone au vent) et que les zones à fortes corrélations positives correspondent à celle où le "profil moyen" est inférieur à l'unité (zone sous le vent) (fig. II.7e).

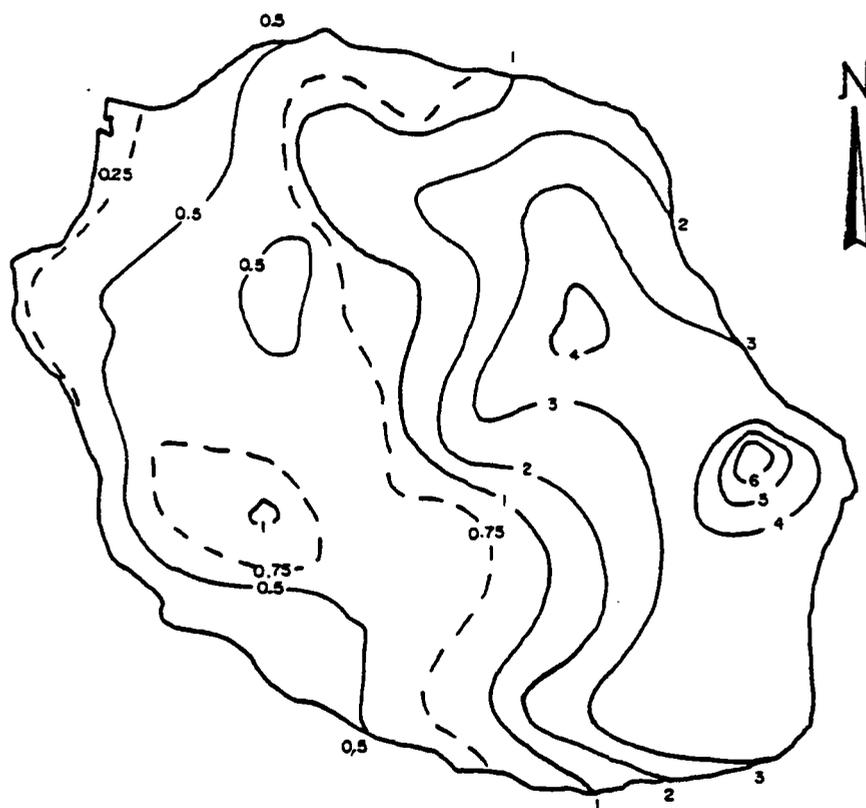


FIG. II.7e- Valeurs moyennes des hauteurs de pluie profilées à La Réunion

Pour tenter de mieux comprendre cette distinction de cinq zones à pluviométrie assez homogène, nous retenons une station dans chacune de ces zones présentant un coefficient de corrélation élevé avec une des com-

posantes, soit :

- Bagatelle	r_1	=	-0,82
- Ligne Paradis	r_1	=	+0,832
- St-Philippe	r_2	=	-0,64
- Petite France	r_2	=	+0,829
- Piton Rouge	r_3	=	-0,834

et étudions la distribution mensuelle des hauteurs de pluies de ces stations.

4.2.1. Etude des valeurs mensuelles profilées

Station de Bagatelle et Ligne Paradis. Il y a une opposition manifeste entre les deux stations qui présentent des profils en "dents de scie" à pics opposés (fig. II.8 et II.9), les mois présentant de fortes valeurs profilées à Ligne Paradis correspondent à de faibles valeurs à Bagatelle (sept. 71, avril 73, octobre 73, etc...). A cette opposition mensuelle, se surimpose parfois une opposition annuelle. En 1974 et 1978, Bagatelle présente de fortes valeurs profilées. Par contre, celles de Ligne Paradis sont assez faibles. Elles augmentent en 1979 à cette station alors qu'au contraire elles baissent à Bagatelle.

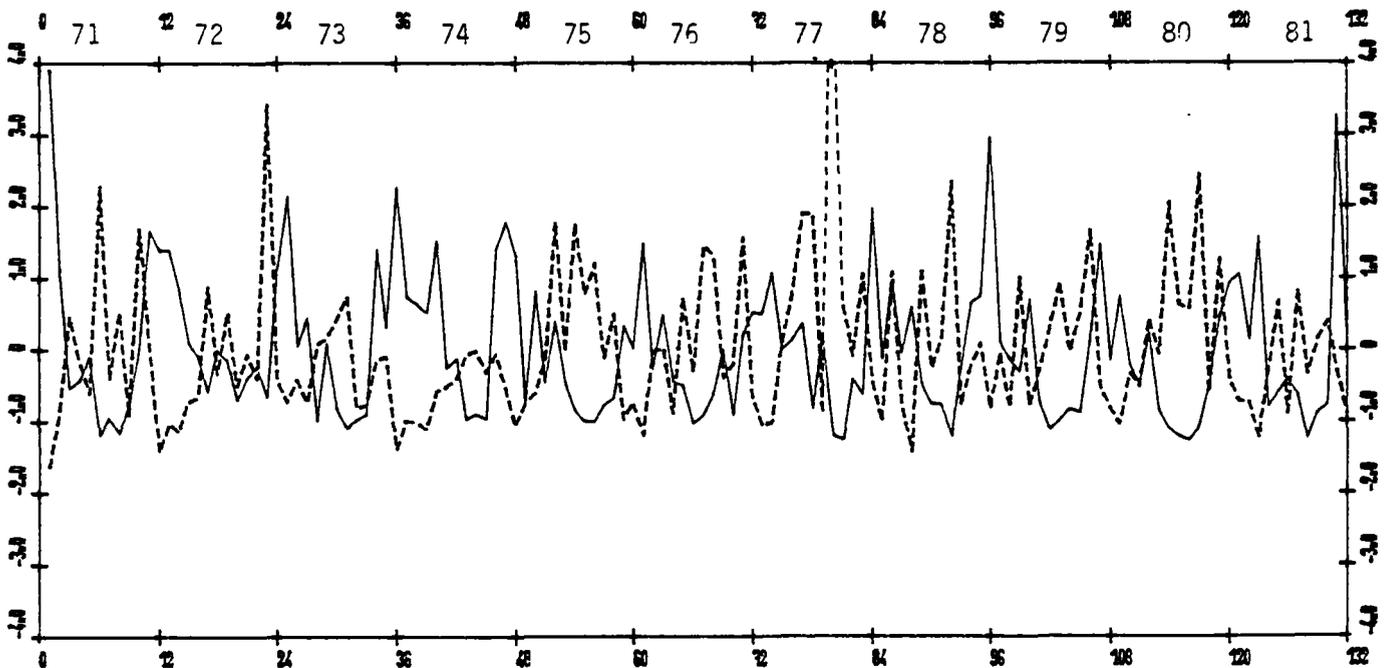


FIG. II.8 - Valeurs profilées centrées réduites des hauteurs de pluie observées aux stations de Bagatelle (—) et Ligne Paradis (---) (Période 1971-1981) - Stations ayant un coefficient de corrélation opposé vis-à-vis de la première composante.

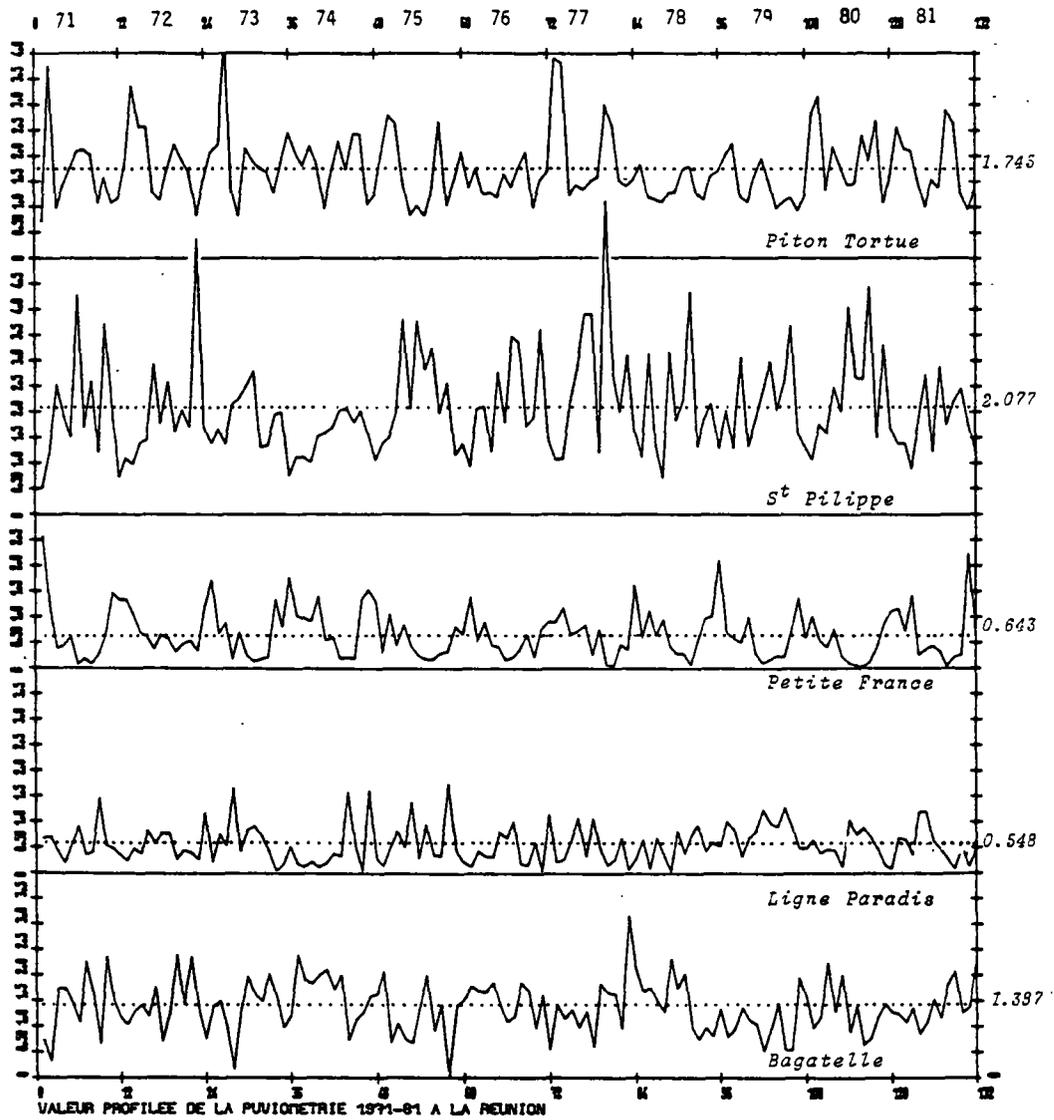


FIG. II.9 - Valeurs mensuelles profilées de la pluviométrie aux stations de Bagatelle, Ligne Paradis, Petite France, St-Philippe et Piton Tortue

Stations de Petite France et St-Philippe. La distribution très irrégulière observée à St-Philippe présente cependant une variation annuelle caractérisée par une inversion des saisons (fig. II.9 et II.10) ; les mois d'hiver apparaissent plutôt pluvieux alors que ceux correspondant à la saison des pluies (décembre à avril) présentent de faibles valeurs profilées. Le phénomène inverse se produit à Petite France qui ne présente des valeurs profilées positives pratiquement que pendant la saison cyclonique. Ces deux stations présentent des valeurs profilées comparables en saison des pluies aux environs de 1,5) et totalement opposées le reste de l'année (maxima 3 à St-Philippe, minima 0,2 à Petite France) (fig. II.10).

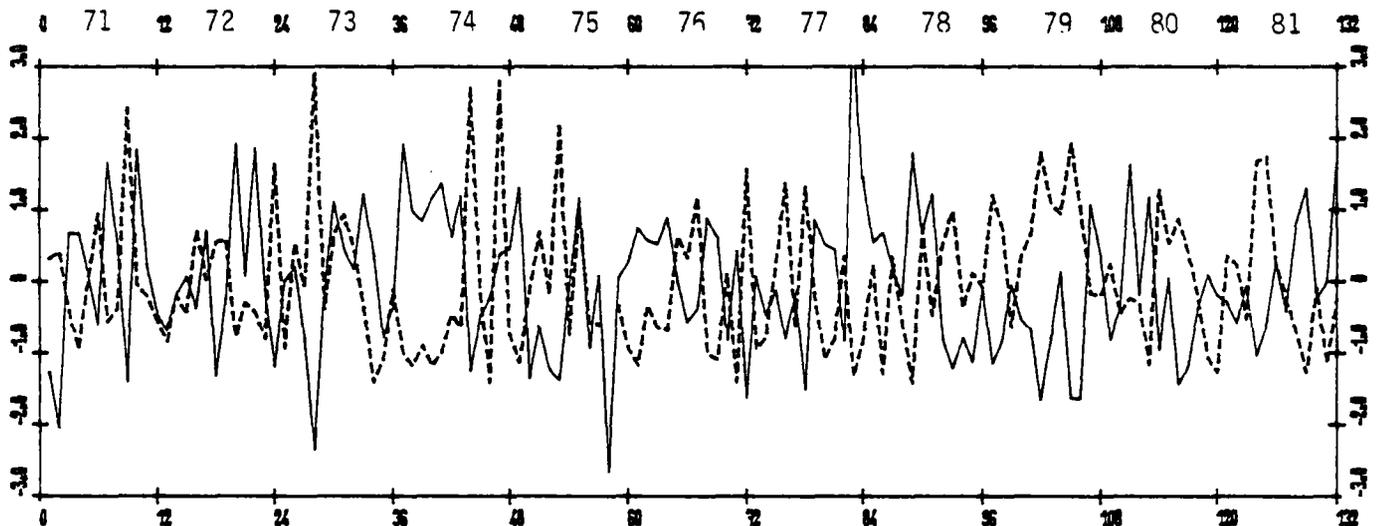


FIG. II.10 - Valeurs profilées centrées réduites de la hauteur de pluie observée à Petite France (—) et St-Philippe (---) - Période 1971-1981

Station de Piton Tortue. Cette station présente également une distribution annuelle singulière (fig. II.9) avec deux minima et deux maxima par années ; des valeurs minimales en saisons intermédiaires (avril à juin et novembre) et des valeurs maximales en milieu de saison des pluies (février) et de saison sèche (septembre-octobre).

4.2.2. Etude de la pluviométrie mensuelle

En valeurs profilées, les distributions mensuelles des pluies à ces cinq stations sont toutes différentes les unes des autres. Cette opposition a guidé la recherche des composantes principales. Nous en cherchons les manifestations sur les valeurs mensuelles de la pluviométrie.

Stations de Bagatelle et Ligne Paradis - Opposition sur la première composante.

Si l'on compare la distribution moyenne mensuelle de la pluviométrie des stations de Bagatelle et Ligne Paradis, les courbes obtenues sont assez semblables et encadrent la courbe représentative

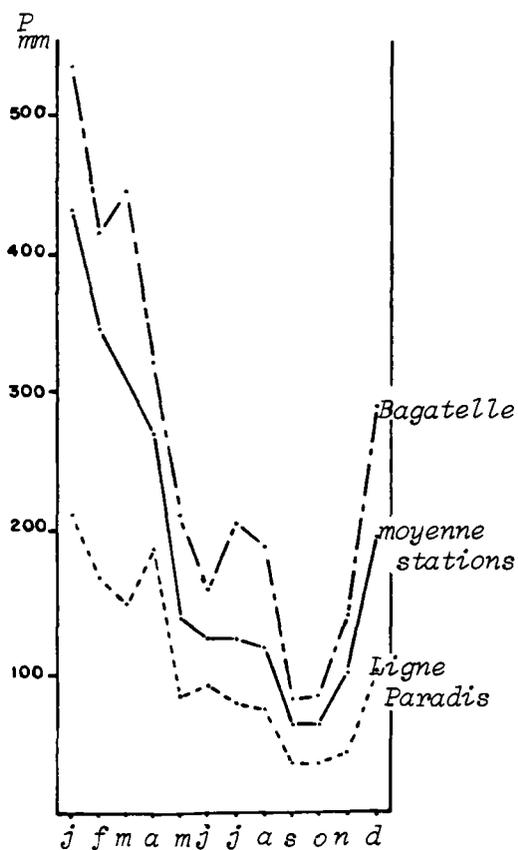


FIG. II.11 Hauteurs moyennes moyennes de pluie à BAGATELLE et LIGNE PARADIS

de la distribution moyenne des 109 stations (fig. II.11). Les petites divergences qui apparaissent cependant en mars-avril-juin et novembre ne dénotent pas une opposition manifeste entre ces deux stations. Ceci prouve une fois encore qu'il convient d'être très prudent avec l'utilisation de ces données moyennes dans un contexte pluviométrique aussi irrégulier qu'à La Réunion. Effectivement, la distribution mensuelle de la pluviométrie pour ces deux stations est très irrégulière d'un mois à l'autre et d'une année à l'autre. Ceci se manifeste par un profil en dents de scie de cette distribution mensuelle par rapport aux valeurs moyennes mensuelles. Si l'amplitude de ces variations est généralement peu importante (ex-

cepté en janvier 1980 : cyclone Hyacinthe), il apparaît cependant un décalage entre ces deux distributions :

un mois plus pluvieux que la moyenne de ce mois à une station est généralement moins pluvieux à l'autre station (avril 1973 à Ligne Paradis, janvier 1974 à Bagatelle en sont les exemples les plus nets) (fig. II.12).

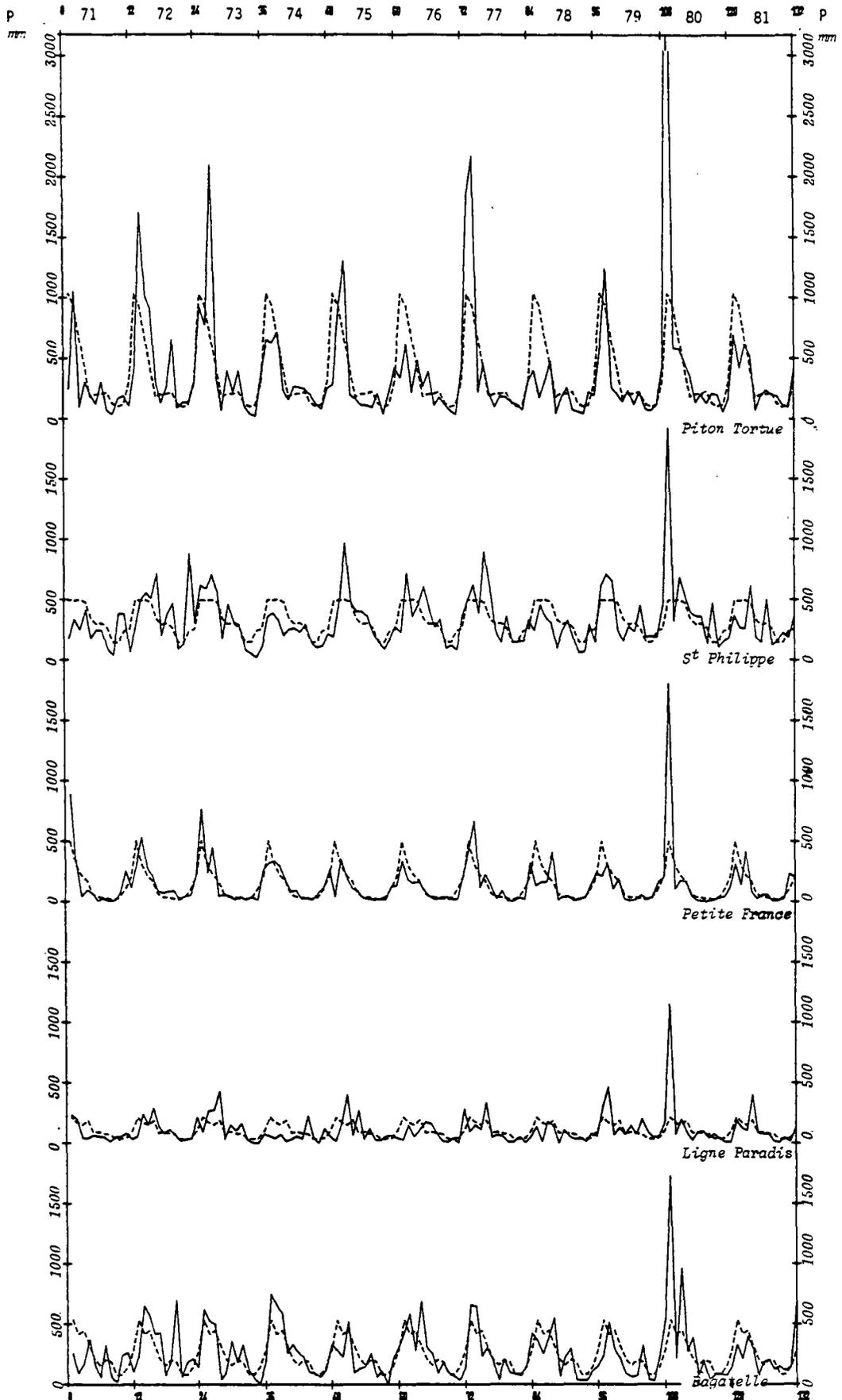
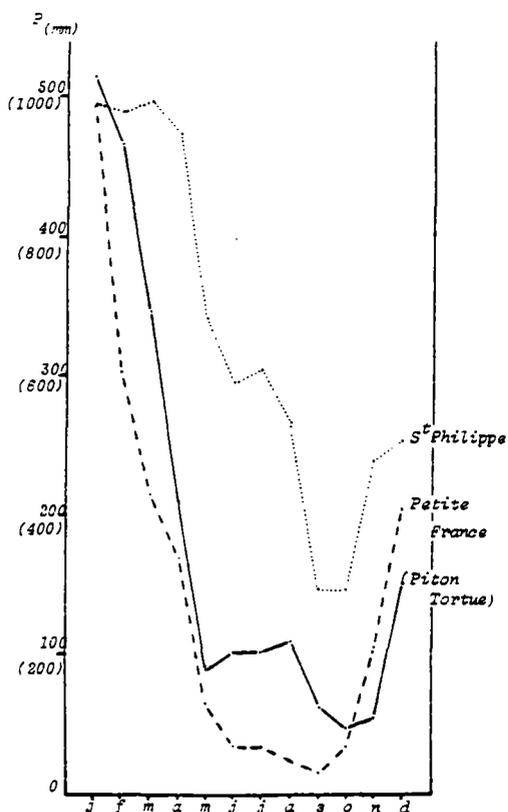


FIG. II.12 - Valeurs mensuelles de la pluviométrie en mm
période 1971-1981 (—)

Valeurs moyennes interannuelles (---)

Stations de St-Philippe et Petite France - Opposition sur la 2ème compo-
sante. S'il apparaît sur toute l'île un contraste entre une saison des



pluies et une saison moins pluvieuse celle-ci est une véritable saison sèche au NO de l'île (mois pendant lesquels la pluviométrie moyenne est inférieure à 40 mm) (fig. II.13). Ce phénomène est régulier d'une année à l'autre (fig. II.12). Par contre, cette saison "sèche" est beaucoup moins sensible à St-Philippe : seule la pluviométrie moyenne des mois de septembre et octobre est inférieure à 200 mm (fig. II.13). Ces épisodes pluvieux sont irréguliers d'une année à l'autre : pour ces 2 mois, 8 totaux pluviométriques sont inférieurs à 100 mm (1 inférieur à 50 mm) et 3 valeurs mensuelles sont supérieures à 200 mm (maximum : 471 mm en septembre 1980).

FIG. II.13 - Hauteurs de pluie moyennes mensuelles aux stations de St-Philippe, Petite France et Piton Tortue (échelle des pluies doublée)

Station de Piton Rouge. La 3ème composante souligne une particularité de la zone centrale de l'île qui présente un fort contraste entre saison des pluies et saison "sèche". Il n'y a pas de saison intermédiaire tout comme à Petite France, mais les pluies d'hiver ne sont pas négligeables ; le palier de pluviométrie intermédiaire des mois de mai à août (200 mm) est peu marqué par rapport au minimum de septembre-octobre (100 mm), surtout relativement au maximum de janvier (1 m) (fig. II.13). La distribution mensuelle de la pluviométrie est également irrégulière dans cette région :

- de fortes pluies interviennent parfois en hiver (654 mm en août 1972),
- en saison des pluies, 9 valeurs mensuelles sont supérieures à 1 m alors que certaines années, le maximum mensuel n'atteint pas 500 mm (fig. II.12).

Nous allons étudier maintenant comme se situe ces 5 secteurs individualisés par l'A.C.P., dans le contexte climatique global de l'île de La Réunion.

4.2.3. Contexte climatologique global de l'île de La Réunion

Le climat de La Réunion est fortement influencé par l'anticyclone de l'Océan Indien.

Dans sa position moyenne, 30-33° de latitude S, celui-ci est à l'origine des alizés du S.E. dont l'influence sur l'île délimite la zone au vent de la zone sous le vent. Son emprise sur La Réunion est plus forte pendant l'hiver austral alors qu'il est plus proche de l'île.

A l'origine ce vent est sec, il se charge d'humidité au dessus de l'Océan (d'autant plus que l'anticyclone est éloigné de La Réunion) et donne des précipitations sur les reliefs de l'île (pluies orographiques).

Différents phénomènes d'instabilité intéressent La Réunion. Pendant l'hiver austral, on observe régulièrement :

- Les fronts d'alizés : ils sont liés à toute modification du régime de ceux-ci, ils sont accompagnés de pluies abondantes qui intéressent surtout le secteur au vent. Mais selon la position de l'anticyclone de l'Océan Indien, ils peuvent venir également du S.SE et arrosent la région de St-Pierre en épargnant le Nord-Est de l'île.
- Les dépressions mobiles, issues du front polaire : elles sont plus rares et amènent des pluies surtout sur le secteur Sud-Ouest de l'île.

Lorsque l'anticyclone de l'Océan Indien se retire vers le Sud, pendant l'été austral, aux perturbations précédentes s'ajoutent :

- Les dépressions tropicales pouvant évoluer en cyclone : leur trajectoire est aléatoire et certaines années aucune n'atteint l'île ; mais si elles l'intéressent, leur emprise est quasi-générale et on note des pics de pluviométrie très élevés sur l'ensemble des stations (exemple : le cyclone Hyacinthe en janvier 1980) (fig. II.12).
- Les vents de "mousson" : ils intéressent le nord de l'île, mais très sporadiquement et se manifestent plutôt par de la houle que par des pluies.

4.2.4. Conclusion

La cartographie des coefficients de corrélations des stations vis-à-vis des composantes principales individualisent cinq secteurs bien délimités de l'île présentant diverses oppositions dans la répartition des hauteurs de pluies. Ces domaines sont associés avec différents phénomènes à l'origine des pluies locales à La Réunion et leur limite d'influence.

La première composante dégage une opposition mensuelle entre le NE (région de Ste-Marie et Ste-Suzanne) et le SO (région de St-Louis - St-Pierre) ; cette opposition est liée à l'origine des principales perturbations pluvieuses sectorielles intéressant l'île, front d'alizés à l'est, dépressions mobiles d'origine polaire au sud-ouest, les forts reliefs de l'île abritant tour à tour les parties de l'île non exposées aux vents dominants. Si les dépressions d'ouest sont particulièrement abondantes ou fortes un mois donné, ou si l'alizé vient du sud, il pleut beaucoup sur la région de Ligne Paradis et peu vers Bagatelle. Inversement, si ces dépressions sont très atténuées, et les vents d'alizés très instables (succession de fronts de secteur Est), il ne pleut pas à Ligne Paradis, les pluies sont abondantes à Bagatelle.

L'opposition liée à la deuxième composante porte sur la pluviométrie de la saison "sèche". La façade maritime du Piton de la Fournaise, E-SE de l'île, reçoit l'influence des deux types de perturbation cités ci-dessus (fronts d'alizés et dépression de secteur ouest) qui sont surtout prépondérants pendant l'hiver, l'anticyclone de l'Océan Indien ayant alors son maximum d'influence sur l'île. Cette saison y est toujours relativement pluvieuse (pluviométrie mensuelle rarement inférieure à 50 mm mais pouvant également dépasser 400 mm). A l'opposé, les hauts de St-Gilles sont protégés des alizés par la chaîne du Piton des Neiges et les hauts du Tevelave et la Plaine des Macques recueillent l'essentiel des pluies dues aux dépressions polaires ; ce secteur n'est exposé qu'au vent de "mousson" qui n'apporte que peu de pluie. Il ne reçoit donc que très peu d'eau en dehors du passage des dépressions tropicales de décembre à avril et connaît une véritable saison sèche.

La troisième composante individualise la zone centrale de l'île qui se manifeste par une répartition mensuelle des pluies particulière avec notamment :

- un mois de février très pluvieux : 4 valeurs supérieures au mètre (1971, 1972, 1977, 1979) et deux seulement inférieures à 500 mm (1978, 1981),
- un hiver beaucoup moins pluvieux que la saison chaude, mais qui reçoit tout de même des pluies abondantes (juillet et août).

C'est dans cette région centrale de l'île que les pluies orographiques ont leur maximum d'importance. Celles-ci jouent toute l'année, ce qui explique qu'il n'y a pas de véritable saison sèche.

Bien que le maximum de pluie n'intervienne pas au sommet du versant exposé au vent, mais plutôt à mi-pente (voir § 2.3.), la région centrale est atteinte par ces pluies quelque soit la direction du vent dominant. L'humidité relative de l'air étant proche de la saturation pendant la saison des pluies, les pluies orographiques (détente et refroidissement) seront très abondantes en cette saison et beaucoup moindres de mai à novembre où l'alizé dominant est plus sec, les fortes perturbations (dépression d'origine polaire,...) peuvent cependant occasionner de fortes pluies (654 mm en août 1972, près de 400 mm en juin et août 1973).

D'un point de vue méthodologique, les différences de comportement apparaissent plus clairement sur les pluies mensuelles profilées (fig. II.9) que sur les pluies mensuelles brutes (fig. II.12), l'effet d'abondance masquant l'essentiel des variations. Pour accréditer cette remarque, nous avons également réalisé une analyse en composantes principales sur les pluies non profilées (annexe II.4) qui est très influencée par l'effet d'abondance et se révèle moins riche que l'analyse sur les pluies profilées.

Les valeurs moyennes mensuelles interannuelles, si elles reflètent la variation saisonnière entre la saison des pluies et la saison "sèche" masquent une grande partie de la variabilité mensuelle des pluies à La Réunion, et sont inadaptées pour décrire les écarts de pluviométrie entre différents secteurs de l'île, et ainsi mettre en évidence des oppositions manifestes liées à l'origine de ces pluies.

Toutes les questions ne sont pas résolues dans l'étude réalisée et notamment un doute subsiste tant qu'à l'influence de la densité des stations sur les résultats de l'A.C.P. Il est en effet évident que les secteurs fortement corrélés avec la première composante correspondent aux zones où la densité des postes est la plus grande tout en ayant un comportement assez homogène (forte corrélation entre les stations d'un même secteur). Ces stations influencent grandement la valeur moyenne retenue pour obtenir les valeurs profilées.

Il serait intéressant de refaire une étude en ne considérant que quelques stations représentatives de chaque secteur afin d'obtenir une densité plus homogène des stations sur l'ensemble de l'île.

5. EXTENSION DES DONNEES DANS L'ESPACE - APPLICATION DES RESULTATS DE L'A.C.P.

5.1. Diverses méthodes d'extension spatiale des données

Les plus simples ne tiennent compte que de la proximité des stations vis-à-vis de la zone à étudier : simple moyenne arithmétique ou éventuellement pondérée par la distance. Au niveau d'un bassin, on utilise ainsi la méthode de Thiessen [10] ou le tracé préalable d'isohyètes [1] (lui même fruit d'une interpolation !). Ces méthodes ne sont pas adaptées à fournir des estimations ponctuelles et ne semblent pas en mesure de rendre compte de l'extrême variabilité spatiale des pluies notamment sur les secteurs particulièrement pauvres en postes pluviométriques.

Toujours à l'échelle d'un bassin ou d'une région donnée, la relation entre la pluviosité et l'altitude permet de prendre en compte ce facteur pour le calcul pondéré des lames d'eau [8]. Cette approche est également inadaptée à La Réunion où une liaison correcte entre hauteur de pluie mensuelle et altitude n'a pu être mise en évidence que sur de petits secteurs précis (voir § 3.2.).

Les méthodes de régionalisation des données plus élaborées (krigeage et formes dérivées) [4] prennent en compte la variabilité du phénomène étudié ; elles permettent de quantifier la précision des estimations. Mais il est nécessaire d'étudier successivement toutes les valeurs à chaque pas de temps.

Aussi, avant d'envisager l'utilisation de ces méthodes ou des méthodes d'interpolation polynomiale [2] ou utilisant les moindres carrées [9], qui sont lourdes d'emploi, nous avons voulu tester les relations réciproques de l'Analyse en composantes principales (ACP).

Pourquoi en effet ne pas utiliser les résultats de l'A.C.P. qui permettent d'interpréter la variabilité spatiale des pluies à La Réunion ?

Les coefficients de corrélation vis-à-vis des différentes composantes semblant se répartir régulièrement sur l'île, il est possible d'affecter une valeur de ces différents coefficients en chaque maille par une méthode simple d'interpolation avec une précision satisfaisante.

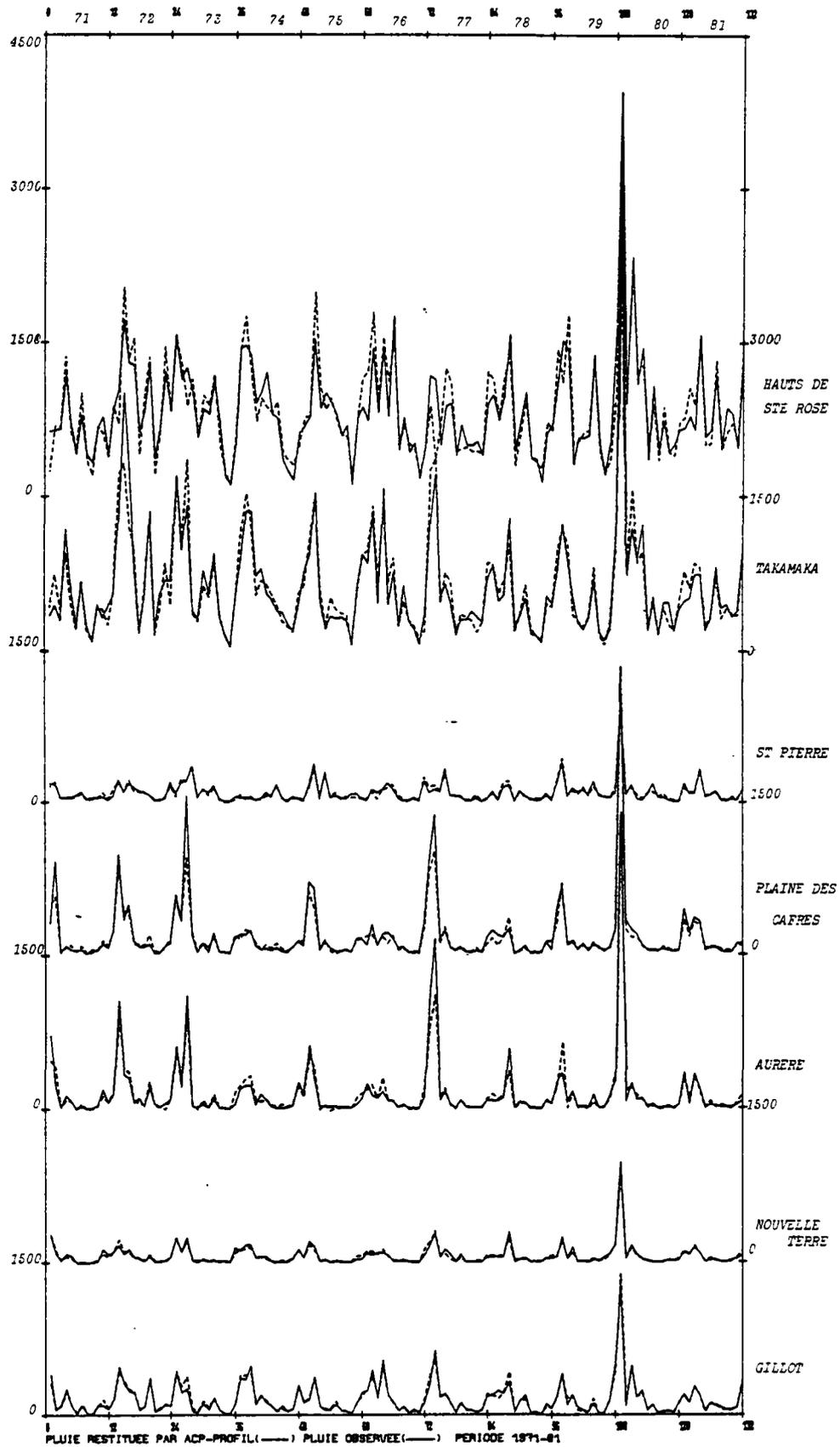
Les composantes principales sont des combinaisons linéaires des variables et réciproquement celles-ci s'expriment linéairement en fonction des composantes. Il est alors possible de reconstituer les hauteurs de pluie à une station à partir des projections de cette station sur les composantes, et de même en chaque maille, après interpolation de ces projections. Avant de réaliser cette interpolation, il convient de vérifier les résultats de cette restitution sur des stations témoins. Si cette restitution s'avère déjà très imprécise sur les stations, il est inutile de poursuivre dans cette voie.

5.2. Application de la méthode à des stations témoins

Nous avons retenu 13 stations représentatives de l'ensemble de la pluviométrie de l'île, et en général la restitution est satisfaisante (fig. II.14 et annexe II.5) même pour les stations très pluvieuses (Takamaka, Hauts de Ste-Rose) où les écarts de pluviométrie entre les différentes saisons sont très importants (1500 mm). Quelques épisodes pluvieux importants sont cependant sous-évalués notamment à des stations assez peu pluvieuses (mars 1973 à la Plaine des Cafres : 888,7 pour 1556,1 mm - février 1977 à Aurère : 1014,8 pour 1229 mm). De cette comparaison, il ressort que la méthode tend à lisser les valeurs tant sur le comportement moyen de la station que sur la valeur moyenne du mois. Une pluviométrie à la fois exceptionnelle par rapport à la station de référence et au mois de référence a de fortes chances d'être assez mal restituée (exemples ci-dessus). Ces phénomènes sont cependant suffisamment exceptionnels pour juger les résultats d'ensemble encourageants et poursuivre nos travaux.

En contrepartie, cette méthode permet de contrôler la saisie des données. Des écarts importants entre valeurs observées et calculées peuvent être dus également à un nouveau report des valeurs observées.

FIG. II.14 - Restitution par A.C.P. de la pluviométrie mensuelle
à 7 stations de La Réunion - Période 1971-1981



6. RESULTATS

6.1. Valeurs mensuelles des hauteurs de pluie à La Réunion (période 1971-1981)

Un programme utilisant une pondération en fonction de la distance (annexe II.5) nous a permis d'affecter en chaque maille les valeurs des paramètres nécessaires aux calculs des hauteurs de pluie mensuelle (valeurs profilées moyennes de la hauteur de pluie et écart-type associé, projections vis-à-vis des composantes).

L'application de la relation :

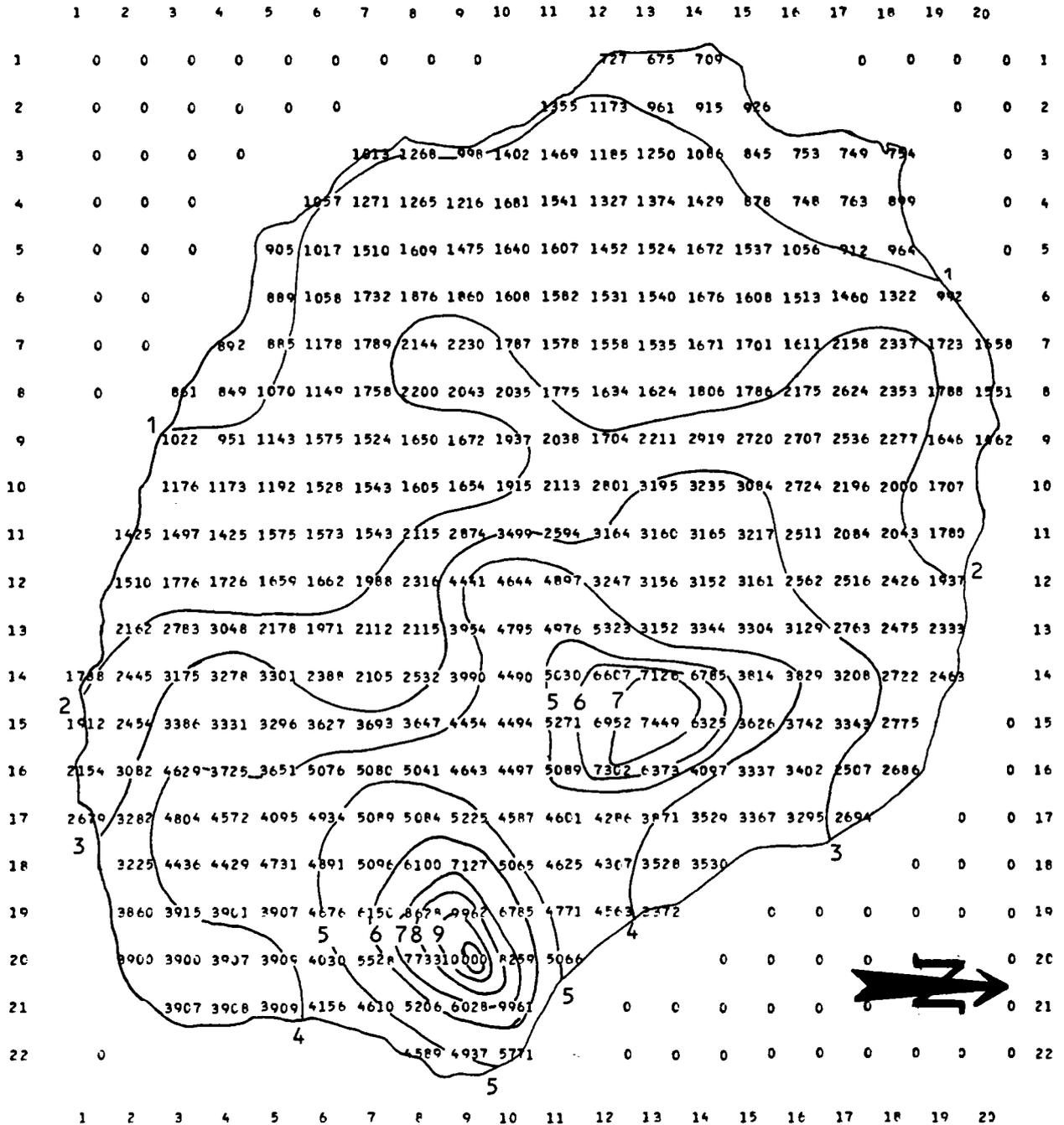
$$P_{mc} = \overline{P}_m \times \left(\sum_{i=1}^4 (\alpha_{ic} \times C_{im}) \times \sigma_{pc}^P \right) + \overline{P}_{pc}$$

- où P_{mc} pluie du mois m à la maille c
 \overline{P}_m pluie moyenne du mois m sur l'ensemble de l'île
 α_{ic} projection de la maille c sur la composante i
 C_{im} projection du mois m sur la composante i
 \overline{P}_{pc} valeur moyenne de la pluie profilée à la maille c
 σ_{pc}^P écart-type associé à cette moyenne

permet d'obtenir un fichier des 132 valeurs de hauteurs de pluie mensuelles sur la période 1971-1981 en chacune des 304 mailles de 3 km de côté qui représentent l'ensemble de l'île de La Réunion. Ces valeurs constituent un fichier de base à partir duquel il est possible :

- d'effectuer un traitement statistique maille par maille :
 - . moyenne mensuelle et écart-type,
 - . classement mois par mois ; saison par saison, année par année ; des valeurs des 11 années permettant de déterminer les valeurs de pluviométrie de fréquence donnée (décennale, ...),
- de cartographier les valeurs mensuelles ou les valeurs statistiques ainsi déterminées sur l'ensemble de l'île (fig. II.15),
- d'évaluer des lames d'eau mensuelles ou de fréquence donnée au niveau d'un bassin versant, d'un secteur de l'île.

FIG. II.15 - Pluviométrie moyenne annuelle à La Réunion, Période 1971-1981



6.2. Critique de la méthode

Chaque composante présentant une gamme de coefficients de corrélation régulièrement distribuée sur l'île (pôles bien individualisés, passages progressifs de l'un à l'autre), l'erreur éventuelle due à l'interpolation de ces valeurs est minime. Elle est plus importante sur les moyennes des valeurs profilées. La méthode automatique employée pour affecter les valeurs en chaque maille (annexe II.5) ne prend pas en compte la topographie, ni la situation de chaque maille par rapport aux stations voisines ; elle n'est fonction que de la distance vis à vis de ces stations. C'est ainsi que la maille 301* (fig. II.15) présente de plus fortes valeurs que ses voisines (292 et 300), celles-ci sont pourtant plus proches du pôle de pluviométrie maximum des Hauts de Ste-Rose (maille 291) et présentent une altitude moyenne supérieure. Mais en fait, ces deux mailles sont également voisines respectivement des stations, Rivière de l'Est et Bois Blanc, qui tempèrent l'influence de la station des Hauts de St-Rose ; par contre, la maille 301 est plus éloignée de ces stations qui n'ont alors qu'une faible influence sur la valeur en cette maille.

Sur une maille donnée, il est donc possible d'obtenir une certaine distorsion, et il convient d'être très prudent dans le cadre d'une étude très ponctuelle, même si au niveau régional ces écarts se compensent (à l'opposé la maille 303 est trop influencée par la station Bois Blanc).

Un soin particulier est à apporter pour l'évaluation des valeurs moyennes des pluies profilées (correction manuelle des zones critiques apparues sur la cartographie automatique, prise en compte de facteurs correctifs locaux (altitude...)).

* voir également les figures I.9 et I.14 et l'annexe I.

7. CONCLUSIONS

Le nombre important de postes (58) à enregistrements complets sur la période 1971-1981 et les coefficients de corrélation élevés entre les stations pluviométriques permet d'estimer les valeurs manquantes en de nombreuses stations avec une précision satisfaisante. Nous obtenons ainsi un échantillon de 109 postes.

Bien qu'aucun secteur de l'île ne soit dépourvu de postes retenus, on note cependant une distribution irrégulière de ces postes entre d'une part les régions littorales du N.E. et du S.O. possédant une forte concentration de stations, et d'autre part les régions centrales de l'île et le Piton de la Fournaise où les conditions d'accès limitent le nombre et la maintenance des pluviomètres.

L'étude de la distribution des pluies sur le profil St-Benoit - St-Pierre, passant par les hautes plaines entre les 2 édifices volcaniques, montre bien l'opposition entre la "côte au vent" très arrosée, et la "côte sous le vent" relativement sèche. Les maxima pluviométriques sont situés à mi-pente sur la "côte au vent", phénomène observé également dans de nombreuses régions de la zone inter-tropicale. L'ascendance rapide des masses d'air humides créée par détente et refroidissement des pluies orographiques sur les premiers reliefs de l'île rencontrés par ces masses d'air apportées par les alizés.

Il apparaît ainsi qu'il n'existe de liaison satisfaisante entre la hauteur de pluie et l'altitude que sur de petits secteurs bien limités et qu'il n'est pas envisageable d'appliquer une quelconque relation entre ces paramètres pour une extension des données à l'ensemble de l'île.

Pour mieux comprendre la distribution des pluies, nous effectuons une analyse en composante principale sur l'échantillon retenu (109 stations, 132 valeurs mensuelles). Afin d'éliminer l'effet d'abondance liée à l'opposition saisonnière des pluies et notamment les précipitations exceptionnelles liées aux dépressions cycloniques qui intéressent l'ensemble de l'île, nous travaillons sur les observations profilées. Les hauteurs de pluie mensuelles à chaque station sont ramenées à un indice d'abondance relative par rapport à la pluie moyenne de ce mois à toutes les stations.

Cette analyse permet d'individualiser 5 secteurs de l'île qui correspondent aux limites d'influence maximale des différents phénomènes générateurs des pluies à La Réunion.

L'opposition liée aux différentes composantes apparaît clairement sur les hauteurs de pluies mensuelles profilées des stations représentatives de chacun des 5 secteurs, et a ainsi permis l'interprétation de ces composantes. L'analyse en composante principale réalisée sur les données mensuelles montre que la première composante traduit effectivement l'effet d'abondance (éliminé précédemment par l'opération de "profilage"). Si les composantes suivantes reprennent les résultats apparus lors de l'analyse sur les données profilées, leur interprétation (comparaison des valeurs mensuelles de stations témoins) est beaucoup plus délicate, l'effet d'abondance masquant toutes les autres variations.

Tenant compte de la répartition régulière des coefficients de corrélation vis-à-vis des composantes, il est possible d'en affecter une valeur en chaque maille avec un risque d'erreur minime lors de l'interpolation. Nous utilisons alors les relations réciproques entre les variables et les composantes pour affecter les valeurs de pluies mensuelles en chacune des mailles. L'application de cette méthode à diverses stations témoins, excepté les rares épisodes pluvieux exceptionnels simultanément vis-à-vis de la station et du mois considérés, donne de bons résultats.

Cette méthode présente l'avantage de limiter les interpolations (et leur biais systématique) : 5 interpolations seulement, au lieu de 132, si mois par mois on affecte une valeur en chaque maille à partir des valeurs aux stations. Si l'épisode exceptionnel tant dans l'espace que dans le temps est lissé en fonction du comportement moyen, on s'affranchit par là même du risque d'erreur lié à une mauvaise saisie de l'information.

BIBLIOGRAPHIE

- [12] BARGEAS A., ROCHE P.A., THIERY D. (1983) - Les méthodes d'évaluation des apports mensuels en eau des systèmes hydrologiques et hydrogéologiques
In : Hydrogéologie - Géologie de l'Ingénieur 1983,n°4
- [1] CHOW V.T. et al. (1964) .- Rainfall, Handbook of applied hydrology - Section 9 .- New-York, McGraw Hill, 68 p.
- [2] CRAIN J.K. (1970) .- Computer interpolation and countouring of two dimensional data with a digital computer .- Geoexploration 8, pp. 173-194
- [3] DIRECTION DE LA METEOROLOGIE .- Bulletins climatologiques mensuels et annuels .- Service Météorologique de La Réunion
- [4] DELHOMME J.P. (1978) .- Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau .- In : Bulletin B.R.G.M., section III, n° 4, pp. 341-375
- [5] JANOUËIX-YACONO D. .- L'optimum pluviométrique dans les régions montagneuses équatoriales en Amérique et Afrique .- Essai d'explication, pp. 417-431
- [6] LEBART L. et FENELON J.P. (1971) .- Statistique et Informatique appliquées .- DUNOD Paris, 425 p.
- [7] LEFEBVRE J. (1980) .- Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles .- MASSON Paris, 2me édition, 259 p.
- [8] ROCHE P.A. et THIERY D. (1983) .- Analyse et modélisation des bassins versants de la Moselle Française .- B.R.G.M. Rapports d'avancement n° 1 et 2, non publiés.
- [9] SCHEARMAN R.J., SALTER P.M. (1975) .- An objective rainfall interpolation and mapping technique .- Hydrol. Sci. Bulletin, XX.3, pp. 353-363
- [10] THIESSEN A.H. (1911) .- Precipitation for large areas .- Month water review, vol 39, n° 7, pp. 1082-1084
- [11] TOUCHEBOEUF DE LUSIGNY P. et LE GOURRIERES D. (1964) .- Hydrogéologie souterraine de La Réunion .- Exposés des résultats obtenus par la mission O.R.S.T.O.M. 1959-1961, 105 p.

ANNEXES

ANNEXE II.1

ESTIMATION DES VALEURS MANQUANTES A PARTIR DES REGRESSIONS MULTIPLES

Dans la grande majorité des cas, nous obtenons des coefficients de corrélation multiple supérieurs à 0,95, ce qui laisse espérer une estimation assez correcte des valeurs manquantes.

Dans certains cas, malgré plusieurs tentatives, ce coefficient de corrélation n'atteint pas 0,9 (station 603). Parfois, aussi la régression multiple n'est calculée que sur un échantillon très réduit d'observations (nombreuses lacunes de la station à expliquer et des stations explicatives).

Dans la région du Piton de La Fournaise, les relations sont établies sur une cinquantaine d'observations (sur 132). Les résultats en sont d'autant moins significatifs, et il existe de nombreuses lacunes synchrones entre ces stations (impossible à estimer à partir de l'équation de régression définie). Nous avons parfois complété les estimations à partir des régressions linéaires.

Nous présentons dans le tableau ci-après, pour toutes les stations présentant des lacunes, l'équation de régression multiple retenue. Les stations sont représentées par leur indice du Service Météorologique de La Réunion (voir annexe I.1).

Station à expliquer	Stations explicatives				Coefficient de corrélation multiple	Observations
275	224	235	256		0.982	
292	253	271	291	313	0.984	
330	320	350	613		0.975	
349	318	338	339		0.99	
351	320	352	360		0.989	
360	351	381	613		0.983	
369	336	379			0.986	
381	391	360			0.986	
402	352	381			0.959	
424	446	453	602		0.966	
453	463	424	452		0.960	
494	602	623	505		0.978	
505	515	485			0.982	
509	438	559			0.930	
515	514	505			0.985	
518	528	505			0.935	
536	544	555			0.962	
537	528	518	547		0.978	
558	528	557	559	568	0.965	
568	557	558			0.974	
601	246	256			0.991	
633	441	442	472		0.974	
215	214	224	234		0.993	
258	257	268	278		0.988	
262	271	261			0.980	
279	268	278	287	318	0.983	
394	446	424			0.972	
396	336	407			0.989	
442	441	451	452		0.976	
452	442	453			0.958	
458	628	488			0.951	
547	528	537			0.946	
613	360				0.944	
614	493	513			0.986	
625	332	394	363		0.975	
619	482	493			0.98	
234	215	254			0.981	
254	233	253	234		0.976	
261	271	626			0.986	
265	225	256			0.985	Éliminée, trop de lacunes, stations voisines très proches
302	271	291	320	332	0.985	Éliminée, trop de lacunes stations voisines très proches
345	313	336	334		0.995	
357	369	367			0.948	
363	394	625			0.957	
367	357	397			0.971	
407	396	407			0.993	
464	484	602			0.968	
603	484	602			0.889	
618	482	493	619		0.992	
635	257	266	268		0.985	
331	320	351	302		0.988	
334	313	394	345		0.994	Éliminée, trop de lacunes Bcp de lacunes, mais situation intéressante (et R élevé)
389	379	439	458		0.908	Bcp de lacunes, mais situation intéressante (et R élevé)
399	379	439			0.952	Éliminée, trop de lacunes
406	446	424	396		0.992	Bcp de lacunes, mais situation intéressante (et R élevé)
457	446				0.997	Éliminée, trop de lacunes (très proche de 446)
465	602	464			0.918	Idem
485	602	446	505		0.986	Idem
488	458	607			0.987	Idem
492	482	493	463		0.992	Idem
600	483	484	503		0.975	Idem
607	457	488			0.990	Idem
621	607	628			0.984	Idem
628	621	488	458		0.984	Idem
634	536	515			0.971	Idem

Un nombre élevé de stations explicatives n'est pas un gage de fiabilité des estimations, comme le montre l'exemple ci-après.

Région des Hauts de St-Denis

* Régression multiple à partir de six stations explicatives

	MOYENNE	ECART TYPE	ECART TYPE SS. BIAIS	COEFF ASYM.	COEFF CURR.	COEFF CORR. PART.	COEFF CURR. PART. S BIAIS	COEFF. DE REGRESS.	T DE STUDENT
210	1.235E+02	1.371E+02	1.377E+02	1.74					
214	1.017E+02	1.115E+02	1.120E+02	1.47	.969	.377	.306	3.609E-01	4.29
224	1.174E+02	1.207E+02	1.272E+02	1.69	.951	.391	.381	2.254E-01	4.48
233	1.203E+02	1.176E+02	1.181E+02	1.40	.953	.113	.062	8.891E-02	1.20
255	1.016E+02	1.004E+02	1.011E+02	2.47	.755	.056	0.000	1.064E-02	.59
234	1.733E+02	1.706E+02	1.773E+02	1.63	.970	.443	.434	2.736E-01	5.20
254	1.706E+02	1.704E+02	1.711E+02	1.98	.937	.107	.050	5.676E-02	1.13
CONSTANTE								-9.813E+00	-4.91

	ECHANTILLON	SS BIAIS	POURCENTAGE DE LA VARIANCE OBSERVEE	(1)
CARRÉ DU COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE		.975	.975	
COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE		.988	.987	

* Régression multiple à partir des trois stations les plus significatives

	MOYENNE	ECART TYPE	ECART TYPE SS. BIAIS	COEFF ASYM.	COEFF CURR.	COEFF CORR. PART.	COEFF CURR. PART. S BIAIS	COEFF. DE REGRESS.	T DE STUDENT
210	1.350E+02	1.898E+02	1.906E+02	4.33					
214	1.105E+02	1.474E+02	1.480E+02	3.76	.982	.511	.305	4.215E-01	6.48
224	1.297E+02	1.727E+02	1.734E+02	4.01	.974	.391	.302	2.284E-01	4.64
234	1.080E+02	2.531E+02	2.542E+02	4.64	.984	.730	.127	3.530E-01	11.65
CONSTANTE								-7.806E+00	-3.94

	ECHANTILLON	SS BIAIS	POURCENTAGE DE LA VARIANCE OBSERVEE
CARRÉ DU COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE		.987	.987
COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE		.993	.993
ECART TYPE DU RESIDU		2.162E+01	2.199E+01

(1) En éliminant les stations les moins significatives (test de Student faible), on obtient des relations établies sur un nombre plus élevé de valeurs et présentant un coefficient de corrélation multiple plus élevé.

On aurait pu également envisager une approche saisonnière des régressions multiples entre les stations, en considérant deux échantillons de valeurs. Les valeurs "d'été" correspondant à la saison cyclonique de décembre à avril, et les valeurs "d'hiver" de mai à novembre.

. Comparaison des résultats obtenus à partir d'un fichier complet (11 années) ou des fichiers saisonniers (11 "hiver" et 11 "été").

Station à expliquer	Stations explicatives	Coefficient de corrélation multiple (nombres d'observations) obtenu à partir des fichiers		
		Année (132)	Eté (55)	Hiver (77)
302	227 332	0.983 (117)	0.978 (48)	0.942 (69)
345	313 336 334	0.995 (98)	0.995 (39)	0.947 (59)
357	369 367 397	0.973 (102)	0.95 (43)	0.979 (59)
363	313 394 625	0.958 (114)	0.948 (46)	0.859 (68)
367	357 397	0.971 (103)	0.942 (43)	0.978 (60)
407	396 397	0.993 (103)	0.992 (44)	0.970 (59)
464	602 484	0.97 (125)	0.955 (54)	0.942 (61)
603	602 484 464	0.89 (119)	0.84 (50)	0.914 (69)
618	482 493 619	0.992 (121)	0.993 (49)	0.982 (72)
635	257 266 268	0.985 (126)	0.978 (52)	0.982 (74)

Les estimations obtenues par les deux méthodes comme dans l'exemple ci-dessous (station 302) sont d'ordre de grandeur tout-à-fait comparable.

. Comparaison des estimations obtenues par les deux méthodes à la station n° 302

Mois	Estimation annuelle	Estimation saisonnière
7	13.7	9.4
8	7.7	1.
9	8.7	2.6
10	33.3	33.1
11	186.8	207.6
38	245.5	248.
40	97.	102.
48	185.8	190.
60	71.6	77.4
63	126.1	132.1
96	107.8	111.8
102	20.1	14.3
124	101.3	108.3
125	15.1	10.7
131	103.2	120.9

Nous nous sommes donc contentés de l'approche annuelle.

ANNEXE II.2

EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE LE LONG DU PROFIL ST-BENOIT - ST-PIERRE

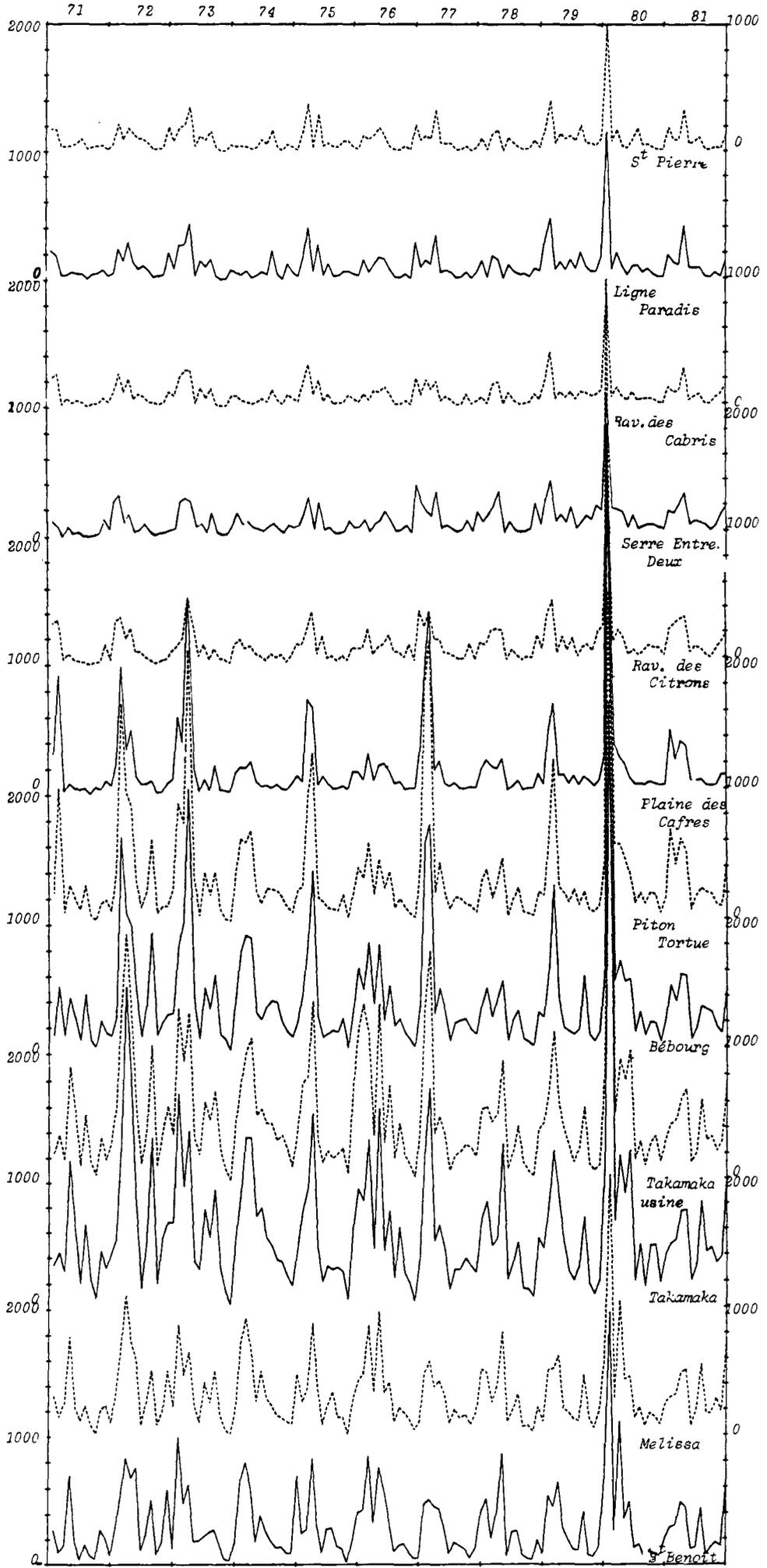
Les pluviométries aux stations de St-Benoît et St-Pierre présentent peu de points communs, si ce n'est l'opposition saisonnière générale sur l'île entre la saison cyclonique l'été, et le reste de l'année.

Ces stations diffèrent notamment sur :

- le module moyen annuel, il pleut trois fois plus à St-Benoît,
- l'amplitude de variations annuelles liée surtout aux fortes précipitations l'été à St-Benoît (pic de l'ordre de 800 à 1000 mm).
- distribution mensuelle :
 - . à St-Benoît : pics parfois doubles l'été, puis décroissance régulière en début d'hiver, petit pic intermédiaire en juillet-août, minimum en septembre ou octobre,
 - . à St-Pierre, distribution assez uniforme tout l'hiver (pas de tendance très nette), seuls les pics atténués de la saison des pluies apparaissent.

Excepté l'épisode Hyacinthe en janvier 1980, les pics correspondent rarement entre les deux stations :

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
St-Benoît	Avr.	Fév.	Jan.	J.F.M.D.	Mars	Fév.Avr.	Jan.Avr.	Avr.	M.D.	Jan.	Mars
St-Pierre	Jan.	Fév.Déc.	Avr.	Août	Mars	Mai.Déc.	Avr.	Avr.	Fév.	Jan.	Avr.



PLUVIOMETRIE MENSUELLE 1971-81 A LA REUNION PROFIL ST-BENOIT-ST PIERRE

L'essentiel de cette évolution intéresse les stations centrales de Takamaka à Ravine des Citrons. Près des côtes :

- de St-Benoît à Takamaka : accentuation des pics et de la pluviométrie générale,
- de St-Pierre à Serre Entre-Deux : la distribution mensuelle évoluée très peu.

Par contre, vers le centre de l'île :

- de Takamaka à Piton Tortue :
 - . différenciation d'années plus ou moins humides, pics inégaux apparaissent
 - . transfert de certains maxima annuels (janvier à mars 1973)
- de Piton Tortue à Ravine des Citrons :
 - . réduction générale de la pluviométrie, avec apparition progressive de l'hiver uniformément peu pluvieux,
 - . accentuation du phénomène précédent, réduction des pics certaines années : 1974, 1976.

ANNEXE 11.3

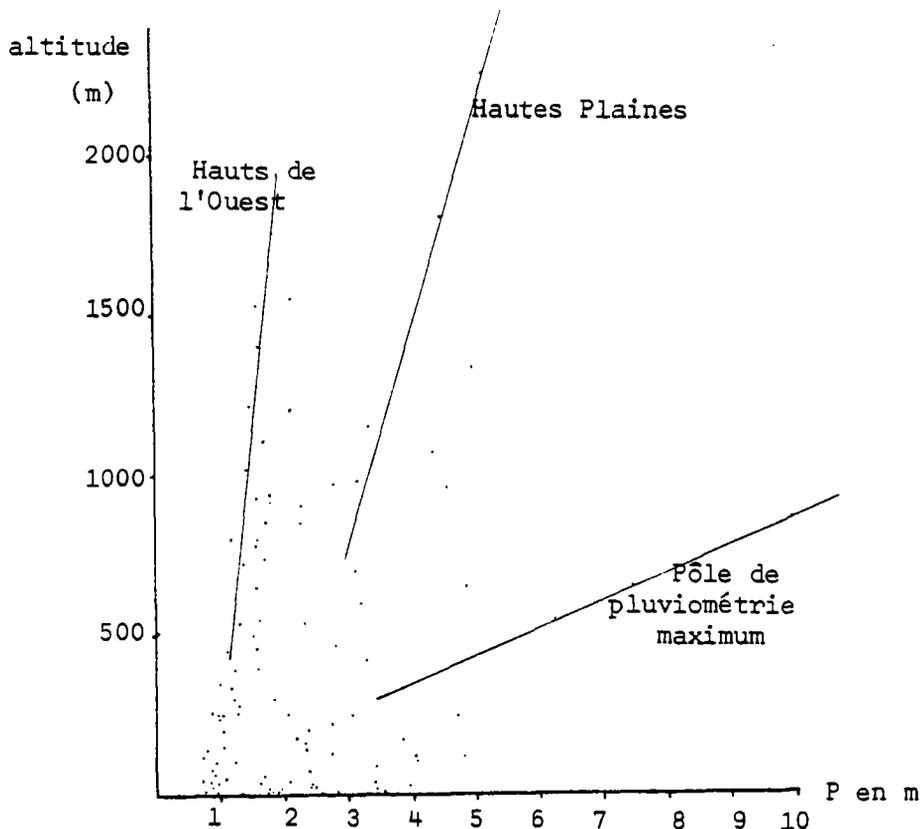
RELATION ENTRE LA HAUTEUR DE PLUIE MENSUELLE ET L'ALTITUDE A LA REUNION

La représentation des couples de points (pluviométrie moyenne interannuelle en fonction de l'altitude) témoigne de la grande dispersion de ces valeurs.

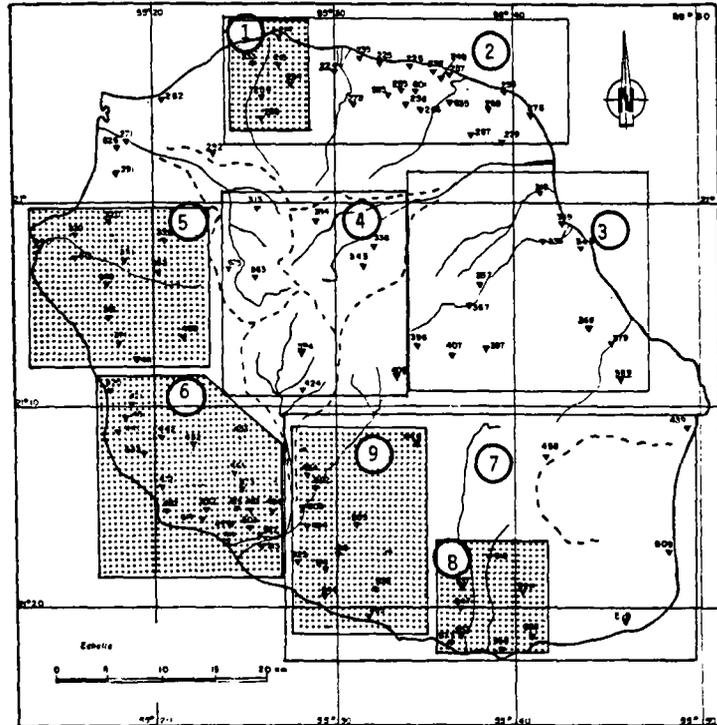
Il est tout à fait illusoire de définir un gradient pluviométrique global sur toute l'île. On note cependant que les points se répartissent selon quelques droites privilégiées symbolisant grossièrement un gradient pluviométrique sur un secteur géographique donné. C'est surtout sensible sur la côte sous le vent (50 à 100 mm/100 m).

Ce gradient augmente ensuite au niveau de la zone centrale de l'île, et à mesure que l'on se rapproche des régions exposées aux vents dominants (≈ 1000 mm/100 m) dans la région de pluviométrie maximum.

A altitude égale, la pluviométrie augmente très nettement à mesure que l'on passe de la côte "sous le vent" aux régions les plus exposées aux vents dominants.



L'étude par secteurs géographiques montre une grande diversité dans les résultats obtenus selon les zones considérées. Les relations significatives sont limitées aux petits secteurs et dans les régions à faible contraste pluviométrique. Ainsi pour les valeurs mensuelles, la relation obtenue ne présente un coefficient de corrélation supérieur à 0,9 que sur les zones 1 ("Hauts de St-Denis") et 6 ("Hauts de St-Louis") (cf tableau ci-dessous).



 Secteur ou la relation linéaire entre la hauteur de pluie mensuelle et l'altitude présente un coef. de corrélation > 0.8

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Coefficient de corrélation	r	0.912	0.145	0.422	0.365	0.808	0.959	0.399	0.870	0.783
Coefficient de la région linéaire	a	1.27	0.33	1.70	1.15	0.59	1.28	1.02	3.28	0.69
$P_{mm} = a * alt(m) + b$	b	1427	2311	4306	1250	908	851	2000	1877	1151

Cette relation peut être satisfaite tout au long de l'année comme pour la zone 6 ; les coefficients de la régression linéaire sont cependant très variables (d'autant plus élevés que le mois considéré est pluvieux).

Inversement sur la zone 2, cette relation est toujours très médiocre (seul le mois de janvier présente un coefficient de corrélation supérieur à 0.5). Certains mois présentent un gradient négatif.

Le plus souvent, on note une dégradation de la relation avec la baisse de la pluviométrie mensuelle. Ainsi sur les zones 7 et 9, les mois de janvier et février présentent des coefficients de corrélation nettement plus élevés que les autres mois.

Les fortes précipitations associées aux dépressions tropicales intéressent souvent l'ensemble de l'île, et les reliefs conditionnent la distribution de ces pluies (coefficient de corrélation maximum sur l'ensemble de l'île pour janvier 1980 (cyclone Hyacinthe) ; coefficients plus élevés pour l'étude régionale pour les mois de la saison des pluies).

RELATION PAR ZONES GEOGRAPHIQUES ENTRE LES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES
ET L'ALTITUDE

Zone 6

Zone 2

STATIONS :

420 421 441 451 463 472 473 482 483 484
493 503 513 615 617 453 633 442 452 614
019 518

GRADIENT POUR LE MOIS : 1
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 221.902 SY= 79.167
R= .924 A= .259 B= 157.522

GRADIENT POUR LE MOIS : 2
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 172.964 SY= 66.963
R= .973 A= .230 B= 115.558

GRADIENT POUR LE MOIS : 3
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 129.310 SY= 46.471
R= .915 A= .157 B= 90.211

GRADIENT POUR LE MOIS : 4
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 169.595 SY= 31.430
R= .832 A= .092 B= 146.560

GRADIENT POUR LE MOIS : 5
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 65.730 SY= 18.122
R= .824 A= .053 B= 52.580

GRADIENT POUR LE MOIS : 6
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 79.145 SY= 25.808
R= .888 A= .081 B= 58.947

GRADIENT POUR LE MOIS : 7
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 49.486 SY= 13.805
R= .780 A= .038 B= 40.001

GRADIENT POUR LE MOIS : 8
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 40.559 SY= 11.392
R= .715 A= .029 B= 33.379

GRADIENT POUR LE MOIS : 9
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 36.177 SY= 17.173
R= .967 A= .059 B= 21.548

GRADIENT POUR LE MOIS : 10
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 42.466 SY= 19.318
R= .925 A= .063 B= 26.735

GRADIENT POUR LE MOIS : 11
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 48.709 SY= 25.154
R= .953 A= .085 B= 27.576

GRADIENT POUR LE MOIS : 12
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 113.205 SY= 41.265
R= .889 A= .130 B= 80.880

GRADIENT POUR L'année
CORRELATION SUR 22 STAT
AM= 249.091 SX= 282.624
YM= 1169.373 SY= 376.170
R= .959 A= 1.276 B= 851.507

STATIONS :

214 224 225 226 233 235 236 245 253 255
256 257 258 268 278 287 275 601 215 258
279 234 254 265 635

GRADIENT POUR LE MOIS : 1
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 440.728 SY= 89.770
R= .611 A= .220 B= 394.054

GRADIENT POUR LE MOIS : 2
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 336.472 SY= 63.394
R= .408 A= .104 B= 316.812

GRADIENT POUR LE MOIS : 3
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 352.808 SY= 82.417
R= -.028 A= -.009 B= 354.554

GRADIENT POUR LE MOIS : 4
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 268.792 SY= 59.435
R= .215 A= .051 B= 259.084

GRADIENT POUR LE MOIS : 5
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 150.096 SY= 50.916
R= -.140 A= -.029 B= 155.518

GRADIENT POUR LE MOIS : 6
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 113.144 SY= 44.004
R= -.256 A= -.045 B= 121.700

GRADIENT POUR LE MOIS : 7
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 132.840 SY= 55.761
R= -.223 A= -.050 B= 142.289

GRADIENT POUR LE MOIS : 8
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 127.656 SY= 49.296
R= -.112 A= -.022 B= 131.863

GRADIENT POUR LE MOIS : 9
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 52.652 SY= 23.379
R= -.126 A= -.012 B= 54.895

GRADIENT POUR LE MOIS : 10
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 57.608 SY= 26.097
R= .103 A= .011 B= 55.571

GRADIENT POUR LE MOIS : 11
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 105.416 SY= 27.817
R= .437 A= .049 B= 96.182

GRADIENT POUR LE MOIS : 12
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 235.936 SY= 48.128
R= .341 A= .066 B= 223.454

GRADIENT POUR L'année
CORRELATION SUR 25 STAT
AM= 189.640 SX= 249.582
YM= 2374.180 SY= 572.644
R= .145 A= .333 B= 2311.034

Zone 9

STATIONS :
446 514 544 555 602 623 494 505 515 536
464 503

GRADIENI POUR LE MOIS : 1
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 274.358 SY= 114.095
R= .944 A= .274 B= 172.691

GRADIENI POUR LE MOIS : 2
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 231.775 SY= 115.141
R= .974 A= .284 B= 126.479

GRADIENI POUR LE MOIS : 3
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 164.050 SY= 39.852
R= .767 A= .077 B= 135.334

GRADIENI POUR LE MOIS : 4
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 182.100 SY= 28.831
R= .326 A= .024 B= 173.478

GRADIENI POUR LE MOIS : 5
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 81.100 SY= 23.014
R= -.100 A= -.006 B= 83.267

GRADIENI POUR LE MOIS : 6
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 97.642 SY= 24.355
R= -.241 A= -.015 B= 103.212

GRADIENI POUR LE MOIS : 7
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 68.508 SY= 31.127
R= -.308 A= -.024 B= 77.496

GRADIENI POUR LE MOIS : 8
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 67.225 SY= 29.478
R= -.130 A= -.010 B= 67.809

GRADIENI POUR LE MOIS : 9
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 36.317 SY= 10.805
R= -.167 A= .005 B= 34.622

GRADIENI POUR LE MOIS : 10
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 39.300 SY= 9.312
R= -.046 A= -.001 B= 39.720

GRADIENI POUR LE MOIS : 11
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 55.458 SY= 20.103
R= .544 A= .030 B= 44.642

GRADIENI POUR LE MOIS : 12
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 110.500 SY= 27.600
R= .673 A= .047 B= 93.060

GRADIENI POUR L année
CORRELATION SUR 12 STAT
AM= 370.58J SX= 394.720
YM= 1406.008 SY= 345.754
R= .783 A= .686 B= 1151.804

Zone 7

STATIONS :
439 445 514 528 544 555 557 559 577 602
623 494 505 509 515 518 536 537 558 568
458 547 464 603

GRADIENI POUR LE MOIS : 1
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 381.142 SY= 222.15J
R= .794 A= .347 B= 246.541

GRADIENI POUR LE MOIS : 2
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 340.31J SY= 201.251
R= .760 A= .301 B= 223.566

GRADIENI POUR LE MOIS : 3
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 285.350 SY= 167.467
R= .457 A= .151 B= 226.963

GRADIENI POUR LE MOIS : 4
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 300.521 SY= 150.114
R= .248 A= .073 B= 272.086

GRADIENI POUR LE MOIS : 5
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 174.81J SY= 114.474
R= .048 A= .011 B= 170.637

GRADIENI POUR LE MOIS : 6
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 182.317 SY= 105.818
R= .104 A= .022 B= 173.902

GRADIENI POUR LE MOIS : 7
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 170.100 SY= 123.644
R= .077 A= .019 B= 162.865

GRADIENI POUR LE MOIS : 8
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 158.925 SY= 112.270
R= .244 A= .054 B= 138.015

GRADIENI POUR LE MOIS : 9
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 79.940 SY= 54.315
R= .040 A= .004 B= 78.294

GRADIENI POUR LE MOIS : 10
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 69.008 SY= 40.939
R= -.032 A= -.003 B= 70.001

GRADIENI POUR LE MOIS : 11
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 97.404 SY= 67.358
R= .060 A= .008 B= 94.310

GRADIENI POUR LE MOIS : 12
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 157.91J SY= 83.975
R= .226 A= .037 B= 143.461

GRADIENI POUR L année
CORRELATION SUR 24 STAT
AM= 387.792 SX= 508.341
YM= 2347.78J SY= 1303.805
R= .399 A= 1.024 B= 2000.665

ANNEXE II.4

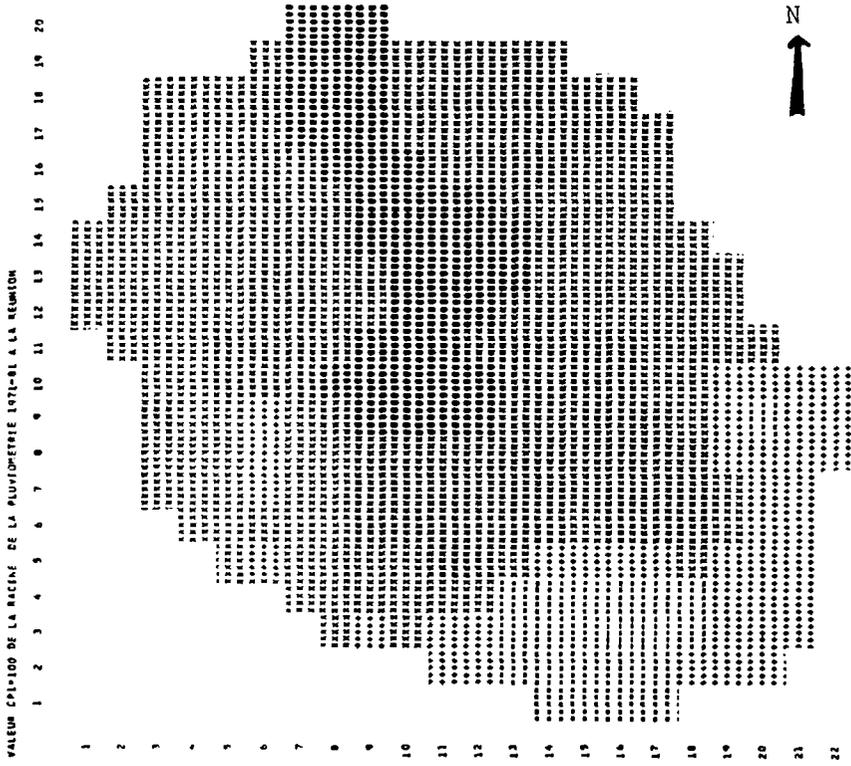
ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES
 REALISEES SUR LES HAUTEURS DE PLUIES MENSUELLES
 (étude sur les racines carrées de ces valeurs)

La variance totale expliquée par les quatre composantes est de 90.4 %, avec respectivement 71.1 %, 11.1 %, 6.2 % et 2 % pour chacune des composantes.

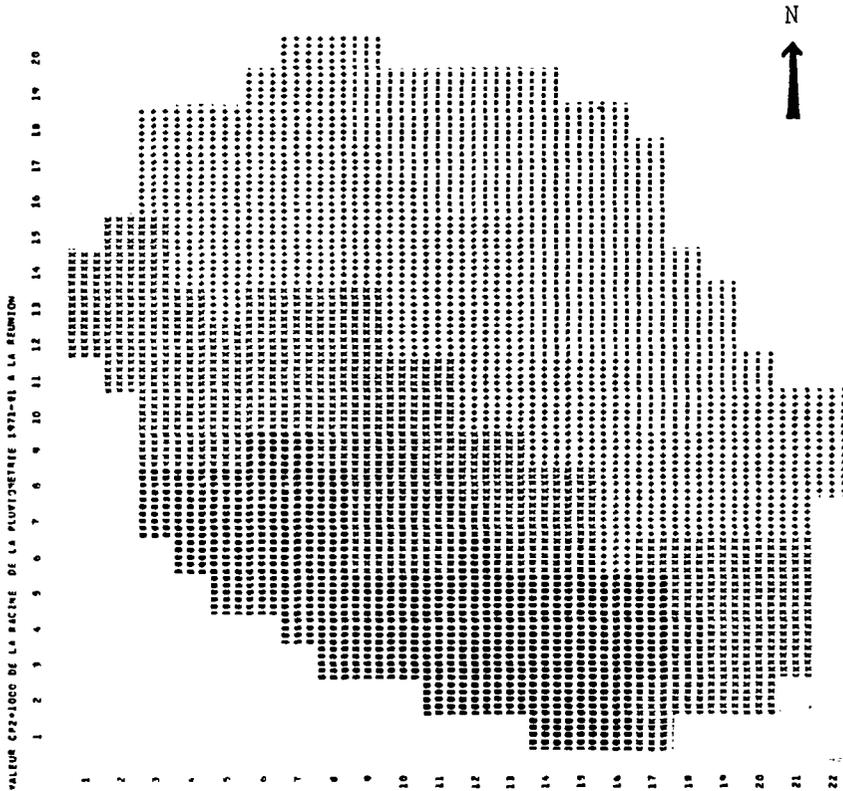
Nous n'avons pas refait une analyse détaillée de ces résultats. Il apparaît cependant que :

- La première composante qui explique 71.1 % de la variance présente un coefficient de corrélation supérieur à 0.7 avec toutes les stations sauf une (pour 92 stations sur 109, $r > 0.8$). Il semble en première analyse que l'écart relatif entre la pluviométrie de la saison humide et celle de la saison sèche soit un des principaux éléments pris en compte par cette composante. Pour reprendre les stations étudiées dans le paragraphe précédent : la station de Piton Tortue caractérisée par cette forte amplitude entre pluie d'été et d'hiver présente un coefficient de corrélation r de 0.905 avec cette composante. Pour les stations de Ligne Paradis et St-Philippe où la pluviométrie est plus irrégulière et l'écart saisonnier est moindre, nous observons respectivement : $r = 0.817$ $r = 0.797$
- Les 3 composantes suivantes reprennent respectivement les secteurs mis en évidence par les 3 premières composantes de l'étude sur les valeurs profilées. En fait, l'étude sur les variables profilées paraît plus approfondie, la première composante des variables non profilées reprend essentiellement les résultats qu'entraîne la transformation des variables (valeurs profilées). Ensuite, les 3 composantes sont à peu près correspondantes dans les deux cas. Il reste une quatrième composante dans l'étude en variable profilée qui n'apparaît pas sur les valeurs brutes. Il ne faut pas attacher une importance démesurée à la variance expliquée par les différentes composantes ou du moins comparer ce qui est comparable. Avec l'étude sur les variables profilées, la variance expliquée est de 64 % contre 90 % à partir des variables brutes, en fait la transformation des variables profilage explique peut-être 30 % au plus de cette variabilité des hauteurs de pluie mensuelle à La Réunion.

1^{ère} Composante



2^{ème} Composante



..... IDE 65.0 A 70.0

 IDE 70.0 A 75.0

 IDE 75.0 A 80.0

 IDE 80.0 A 85.0

 IDE 85.0 A 90.0

 IDE 90.0 A 95.0

 IDE 95.0 A 100.0

..... IDE -700.0 A -500.0

 IDE -500.0 A -300.0

 IDE -300.0 A -100.0

 IDE -100.0 A 100.0

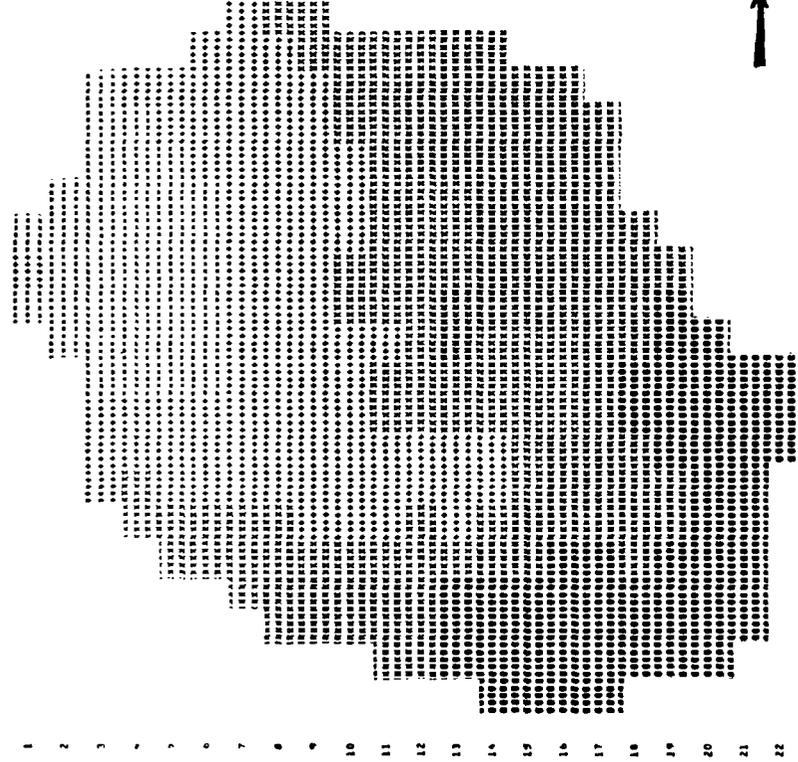
 IDE 100.0 A 300.0

 IDE 300.0 A 500.0

 IDE 500.0 A 700.0

3ème Composante

VALEUR CPASICO DE LA PACINE DE LA PLUVIOMETRIE 1971-81 A LA REUNION



----- IDF -781.0 à -930.0

 ***** DDE -551.0 à -530.0

 ***** DDE -300.0 à -100.0

 ***** DDE -100.0 à 100.0

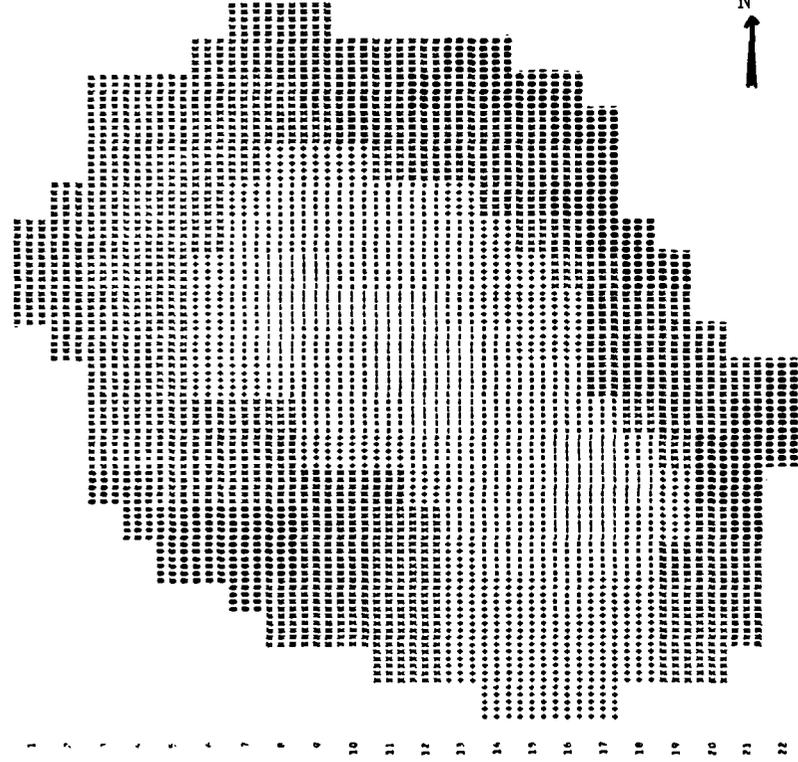
 ***** IDF 100.0 à 300.0

 ***** DDE 300.0 à 930.0

 ***** DDE 900.0 à 700.0

4ème Composante

VALEUR CPAS1000 DE LA PACINE DE LA PLUVIOMETRIE 1971-81 A LA REUNION



----- IDF -600.0 à -300.0

 ***** DDE -300.0 à -200.0

 ***** IDF -200.0 à -100.0

 ***** IDF -100.0 à 0.0

 ***** IDF 0.0 à 100.0

 ***** IDF 100.0 à 200.0

 ***** IDF 200.0 à 300.0

ANNEXE 11.5

EXTENSION DES DONNEES

Les composantes principales sont des combinaisons linéaires des variables contrées réduites ($u_{m,s}$) et réciproquement, la pluviométrie profilée centrée réduite du mois m à la station s est une combinaison linéaire du produit des projections α_{is} de la station s et des projections C_{im} du mois m sur chacune des i composantes principales.

$$u_{m,s} = \sum_{i=1}^4 \alpha_{is} \times C_{im}$$

Tenant compte de la relation entre la pluie mensuelle profilée centrée réduite et la pluie mensuelle, la pluviométrie du mois m à la station s , P_{ms} s'exprime :

$$P_{ms} = \overline{P}_m \times \sigma_{P_{ps}} \times \sum_{i=1}^4 \alpha_{is} \times C_{im} + \overline{P}_{ps}$$

$$\overline{P}_m = \frac{1}{109} \sum_{s=1}^{109} P_{ms} \quad \text{pluie moyenne du mois } m \text{ aux } 109 \text{ stations}$$

$$\overline{P}_{ps} = \frac{1}{132} \sum_{m=1}^{132} \frac{P_{ms}}{\overline{P}_m} \quad \text{valeur moyenne des pluies profilées à la station } s \text{ et } \sigma_{P_{ps}} \text{ l'écart type associé.}$$

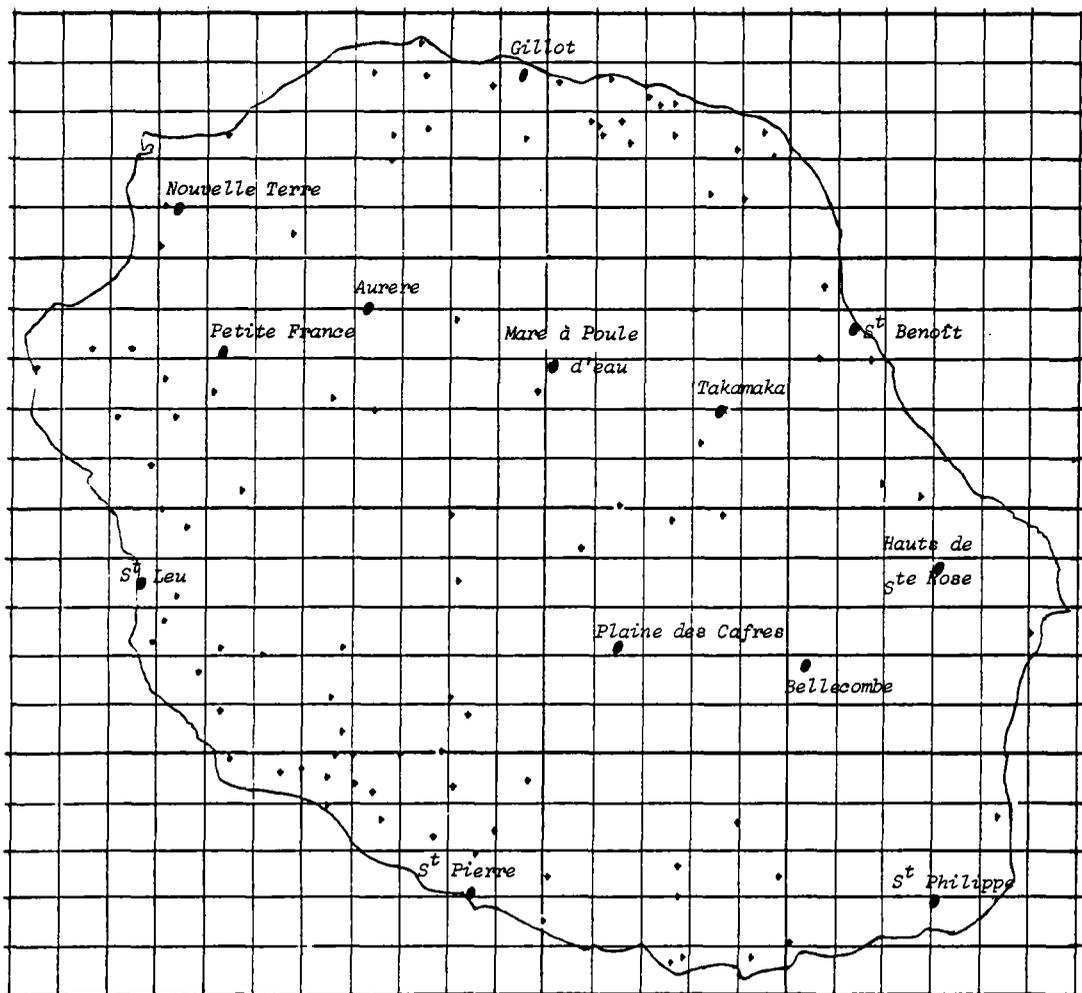
En une maille c quelconque de l'île, nous aurons la même relation. Il suffit d'interpoler la valeur moyenne \overline{P}_{pc} , l'écart-type $\sigma_{P_{pc}}$ et la projection de ces mailles vis à vis des composantes principales α_{ic} , à partir des valeurs respectives aux stations.

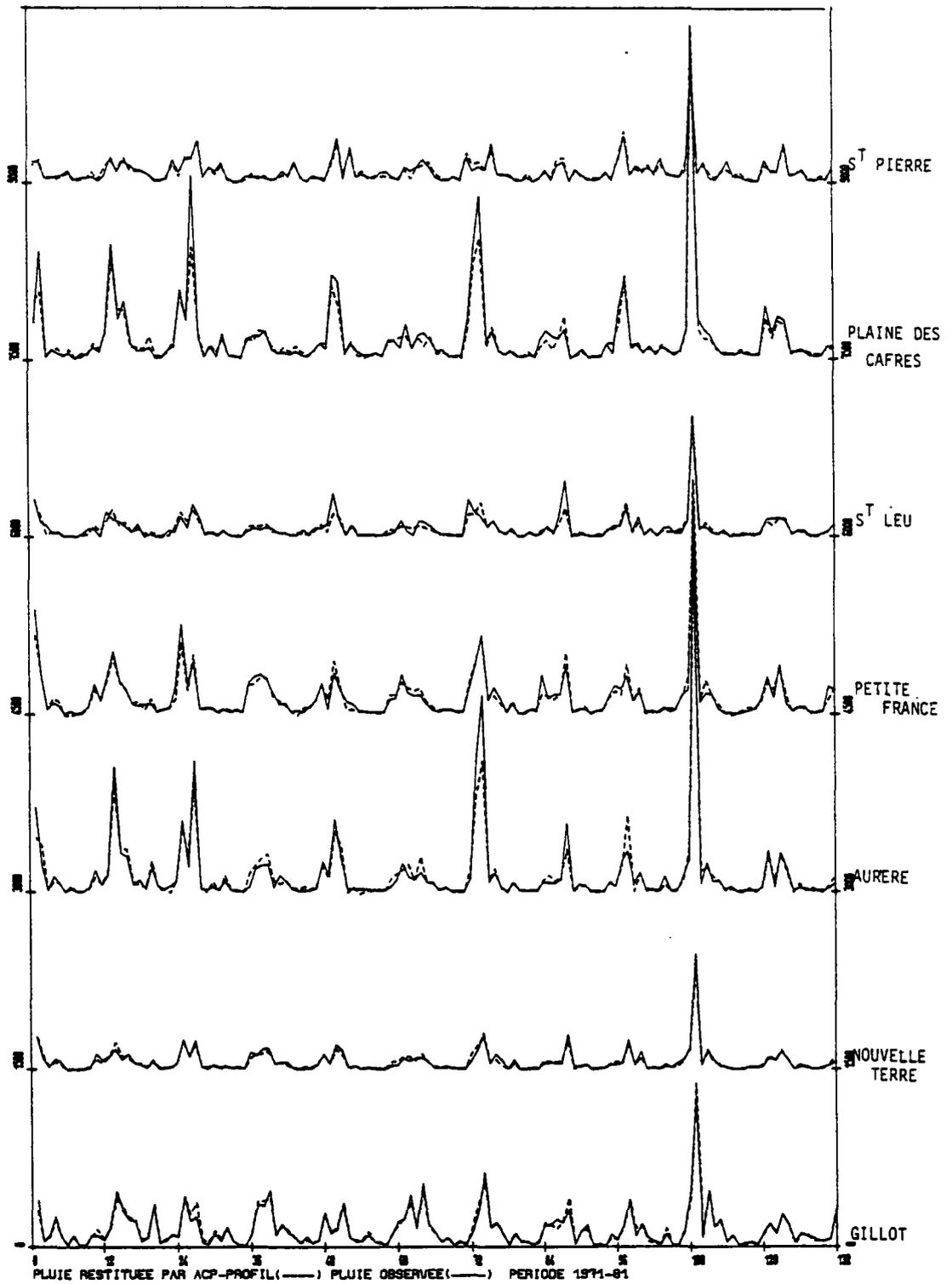
Nous avons utilisé un programme qui affecte une valeur à chaque carré d'un maillage par interpolation à partir de la valeur en x stations de coordonnées définies. Les paramètres limitant cette recherche sont :

- un nombre minimal de stations,
- une distance maximale entre le centre du carré considéré et les stations à valeurs connues, une station a d'autant plus d'influence sur la valeur d'une meille qu'elle en est proche.

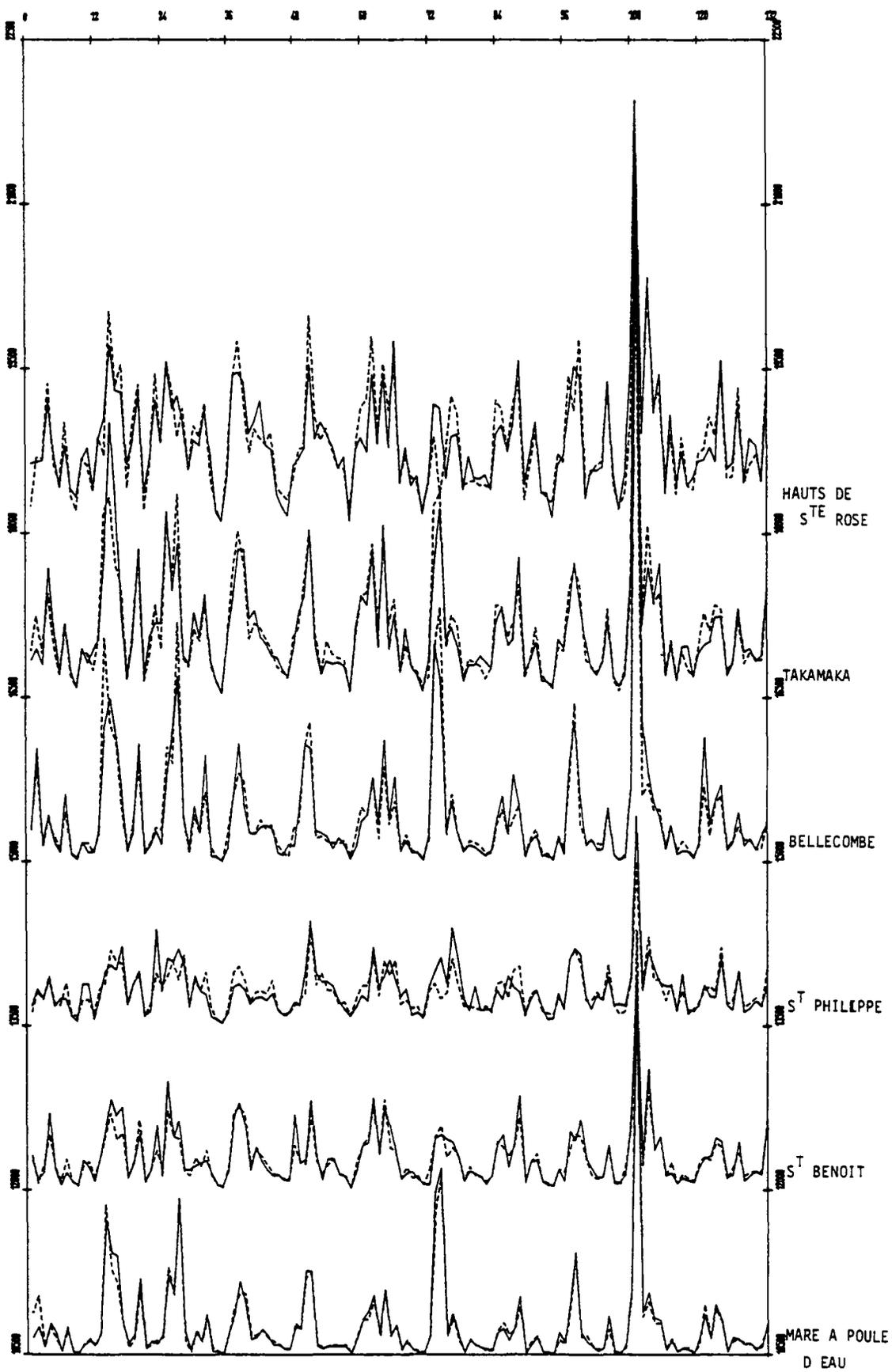
Nous avons appliqué ces relations réciproques de l'ACP sur 13 stations témoins représentant les différentes conditions pluviométriques rencontrées à l'île de La Réunion.

La comparaison des valeurs ainsi estimées aux valeurs observées à ces stations est figurée sur les pages suivantes.





Les hauteurs de pluies aux différentes stations sont successivement décalées en ordonnée de 1500 mm.



3me PARTIE

EVALUATION DE LA REPRISE PAR EVAPOTRANSPIRATION
APPROCHE DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE
PAR LA FORMULE MENSUELLE DE L. TURC SUR L'ENSEMBLE DE L'ILE
Période 1971-1981

Nous avons évalué dans la deuxième partie les apports en eau par la pluie sur l'ensemble de l'île. Maintenant nous cherchons à quantifier la reprise par évapotranspiration.

Confrontant les différentes méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration aux données disponibles sur l'île de La Réunion, nous en venons à utiliser la formule de Turc mensuelle faisant intervenir la température, l'insolation et l'humidité relative.

Il convient donc au préalable d'affecter en chaque maille les valeurs mensuelles de ces différents paramètres climatiques, comme nous l'avons précédemment réalisé sur les hauteurs de pluie.

Nous essaierons de chiffrer la précision de cette évaluation de l'ETP (évapotranspiration potentielle) en tenant compte de l'incertitude sur la détermination des valeurs de température et d'insolation et également en confrontant ces valeurs à d'autres indices d'évaporation.

1. POURQUOI L'APPROCHE DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP) PAR LA FORMULE DE TURC ?

1.1. Différentes méthodes d'approches de l'évapotranspiration

Intéressant à la fois le climatologue, l'agronome et l'hydrologue, l'estimation de l'évapotranspiration fait l'objet, depuis une trentaine d'années, de travaux très variés aboutissant à la définition de nombreux termes (A. PERRIER [21])..

Communément, les deux principaux sont :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP) définie par Thortwhaite qui représente la demande climatique en eau,
- l'évapotranspiration réelle (ETR) qui est modulée en fonction des apports d'eau disponibles au sol.

Outre la pluviométrie et éventuellement l'irrigation, la capacité de rétention en eau du sol (lié à sa structure, composition, profondeur), le type de végétaux et leur stade de croissance influence ce paramètre dont l'évaluation devient alors plus complexe.

Il se dégage ainsi deux grandes orientations dans cette recherche, soit l'estimation préalable de l'ETP (plus simple à appréhender, puisque dépendant principalement des facteurs climatiques) qui est ensuite confrontée à la quantité d'eau disponible dans le sol, soit une estimation directe de l'ETR.

Dans les deux cas, cette estimation peut se faire de manière directe par mesures in-situ (lysimètres, évapotranspiromètres, suivi de profils hydriques...) ou indirectes (formules climatiques,..., ajustements statistiques).

Le choix de la méthode est également conditionné par la superficie de référence qui peut varier de la parcelle (quelques mètres-carrés) au bassin versant (km^2 à 10^6 km^2), voire au continent...

La précision apportée par la mesure ponctuelle de nombreux paramètres restreint les résultats aux points d'observation ; l'extension de ces résultats au niveau régional nécessite alors un réseau de mesures complet pour connaître la répartition spatiale des différents paramètres.

Il n'est pas de notre ressort de présenter un catalogue exhaustif de toutes ces méthodes. Nous présentons cependant un examen des grandes tendances actuelles pour essayer de mieux cerner ce paramètre.

1.1.1. Mesures in situ

Que ce soit un évapotranspiromètre ou un lysimètre (mesures des évapotranspirations), un simple bac (évaporation d'une surface d'eau libre) ou sur évaporomètre Piche (évaporation à travers une paroi poreuse), l'inconvénient majeur de ces appareils tient à leur non-représentativité à l'échelle régionale : ce sont des échantillons, de dimension réduite (effet de paroi) avec un sol et une végétation donnée (ou simplement de l'eau). De plus, pour ceux ne mesurant qu'une évaporation, il faut ensuite introduire les résultats obtenus dans des équations plus ou moins complexes ou établir des relations empiriques locales entre évapotranspiration et évaporation. Néanmoins, avec de grandes précautions d'installation (reconstitution du sol, anneau de garde), des soins et contrôles réguliers (coupe de l'herbe) certains de ces appareils (évapotranspiromètre et lysimètre pesable) fournissent ponctuellement des mesures de référence, et il est possible de descendre à une évaluation sur pas de temps très court (1 heure).

La méthode des profils hydriques, délicate et coûteuse (sonde à neutrons), permet également une analyse fine de l'évolution de l'eau dans le sol, mais il se pose toujours le problème de la représentativité de ces résultats.

1.1.2. Formules empiriques

Il s'agit de formules faisant intervenir des paramètres climatiques (température, insolation, humidité de l'air, vent) ajustées statistiquement sur les mesures d'évapotranspirations de référence (en général, ETP sur gazon).

Leur principal avantage tient au nombre réduit de ces paramètres, qui sont en principe mesurés en de nombreux postes (température pour la formule de Thornthwaite).

Etablies dans des secteurs plus ou moins précis, ces formules constituent souvent une bonne approche "locale" (là où elles ont été définies), mais sont parfois fort imprécises sous des climats différents.

1.1.3. Méthodes basées sur le bilan d'énergie et le bilan hydrique

L'évaporation est un phénomène énergétique lié à un transfert de chaleur. A ce titre, elle intervient dans le bilan d'énergie au niveau de la surface du sol qui peut s'écrire :

$$R_N + S + Q_H + Q_E = 0$$

où R_N rayonnement net
 S flux de chaleur dans le sol
 Q_H flux de chaleur sensible
 Q_E flux de chaleur latente : phénomène où intervient l'évaporation.

Basée sur cet équilibre, la formule de Penman donne une valeur de l'ETP en fonction de paramètres climatologiques (température, insolation, humidité relative et vent). Cette méthode est également citée comme valeur de référence (précision de $\pm 10\%$). Cette expression est la somme d'un terme radiatif et d'un terme advectif.

A partir de cette expression, différents auteurs proposent des formules simplifiées reposant sur un nombre restreint de paramètres. BOUCHET [4] fait ainsi intervenir l'évaporation mesurée sur évaporomètres Piche, mais des coefficients liés notamment au type d'installation et au climat doivent être déterminés localement par rapport à des mesures de référence (l'installation de ce dispositif et le relevé des mesures, s'ils ne sont pas très rigoureux, conduisent à des erreurs). BROCHET et GERBIER [5] ont établi au niveau de la France métropolitaine une formule basée sur l'insolation, la température et la vitesse du vent ; son application à d'autres climats nécessitera l'ajustement préalable de coefficients climatiques.

Un appareillage spécifique (bilanmètre, fluxmètre, psychromètres différentiels) permet d'évaluer directement l'ETR à partir du bilan d'énergie (exemple : le dispositif BEARN [21]).

Toujours à partir de ce bilan d'énergie, BAKALOWICZ [2] , GOENANA et OBERLIN [21] proposent, dans des conditions particulières (sols humides, phénomènes d'advection limitée), l'estimation de ETR à partir du rayonnement net au pas de temps journalier.

BOUCHET [4] définit à une échelle régionale une relation entre ETP, ETR et le rayonnement de façon empirique. RIOU [16] vérifie l'étroite dépendance entre ETR et ETP, et l'intérêt des mesures de rayonnement pour des climats tropicaux d'Afrique. Il définit régionalement une relation du type : $ETP = a \times \text{rayonnement}$.

Toujours dans l'optique d'une étude régionale, signalons aussi les recherches menées notamment par JACKSON et al. [11] et SEGUIN et al. [20] sur la télédétection (thermographie infra-rouge) qui permet une approche rapide de la température de surface du sol. Ces auteurs obtiennent une bonne représentation de l'évapotranspiration à partir de formules simplifiées basées sur le rayonnement et cette température de surface. Ces démarches prometteuses demandent cependant à être testées sous différents climats et nécessitent des techniques particulières.

RASMUSSEN [14] a montré que le bilan d'eau atmosphérique à grande échelle ($> 10^6 \text{ km}^2$) donne également de bons résultats (utilisation de radiosondage et satellites).

Nous n'aborderons pas l'aspect purement agronomique des recherches sur l'évapotranspiration tout en sachant l'importance de ces phénomènes (types de végétaux, coefficients culturaux, état de croissance, état physiologique, régulation stomatiques, ...).

Si on connaît quelques éléments sur les plantes cultivées (cannes à sucres - F.A.O. [9]), par contre les végétations primaires et sauvages sont méconnues, et il n'est pas possible de palier à cette imprécision.

Toute une panoplie de méthodes plus ou moins opérationnelles sont donc disponibles. Elles font intervenir des moyens et des paramètres plus ou moins complexes qu'il convient de confronter aux mesures effectuées sur le secteur d'étude, mais au préalable nous avons recherché les études comparatives qui chiffrèrent les écarts obtenus par application des différentes formules.

1.1.4. Etudes comparatives

La plupart des auteurs condamnent l'utilisation de la formule de Thorthwaite (SEGUIN [19] en région méditerranéenne, LE CARPENTIER [21] en régime tropical, le C.I.E.H. [7] en Afrique de l'Ouest, PADMANABHAMURTY [17] en Inde).

LE CARPENTIER [21], en zone montagneuse intertropicale sub-humide de la Colombie du Nord (dont le climat présente quelques points communs avec celui de La Réunion) étudie différentes formules en 3 stations et sur 60 mois consécutifs. En prenant comme référence la formule de Penman, c'est la formule de Turc qui présente le plus d'analogie dans la distribution des valeurs mensuelles d'ETP (avec une sous-estimation assez régulière). Les formules basées sur le déficit de saturation surestiment au contraire ces valeurs.

SEGUIN [19] effectue une étude analogue sur le S.E. de la France (conditions climatiques différentes de La Réunion, mais présentant cependant quelques analogies avec la côte sous le vent). Il compare les résultats de trois formules empiriques (Thorthwaite, Blaney Criddle, Turc) de la formule de Penman, et formules simplifiées de la Météorologie Nationale et du bac-type Colorado aux mesures de l'ETP in-situ par évapotranspiromètre.

Les trois formules empiriques sous-estiment l'ETP surtout en période estivale. Cette sous-estimation est générale toute l'année pour la formule de Thorthwaite et de Turc, alors que la formule de Blaney Criddle lisse cette répartition mensuelle (surestimation des faibles valeurs en hiver, sous-estimation des fortes valeurs en été). La corrélation entre les valeurs décadaires de la formule de Turc ET_{TU} et de

l'ETP mesurée (ETP) donne :

- pour l'ensemble de la période : 106 observations (exprimée en mm j^{-1})

$$ET_{TU} = 0,75 \text{ ETP} + 0,4 \quad r = 0,98$$

- pour les mois d'été (mai à septembre) : 45 observations (exprimée en mm j^{-1}) :

$$ET_{TU} = 0,58 \text{ ETP} + 1,3 \quad r = 0,93$$

SARRAF [18], au Liban, aboutit aux mêmes conclusions, fortes sous-estimations en période estivale de la part de ces formules. Les formules de Penman et dérivées donnent de meilleurs résultats ; mais sans être parfaites, elles reprennent un peu la tendance de la formule de Blaney-Criddle ; les formules simplifiées de la Météorologie donnent des résultats très semblables à ceux de la formule de Penmann complète. Les valeurs obtenues au bac Colorado présentent une répartition moyenne mensuelle analogue à celle de la formule de Turc, mais avec une plus grande dispersion et une relation très différente de celle observée sous d'autres climats.

SEGUIN estime que cette mauvaise estimation des valeurs estivales par les formules empiriques tient au fait que celles-ci ne peuvent prendre en compte l'accroissement relatif de l'énergie advective dû notamment à la sécheresse du climat de ces régions (accroissement de température et du déficit de saturation de l'air).

Le C.I.E.H. [7] effectue également une étude comparative en Afrique de l'Ouest (Sénégal, Niger, Haute-Volta, travaux de l'I.R.A.T.). Les formules de Walker, Turc et Blaney-Criddle donnent des résultats assez corrects (tendance à la sous-estimation), surtout en prenant la température à 12 h plutôt que la température moyenne journalière. Le bac type ORSTOM donne des résultats également acceptables.

1.2. Données disponibles à La Réunion

Nous avons montré, lors de l'inventaire des données (voir 1re partie, § 2.1.) que seules les stations de Gillot et de St-Pierre sont des sta-

tions météorologiques complètes* fonctionnant sur toute la période 1971-1981 ; les deux autres, Le Port et la Plaine des Cafres, ont été installées au cours de cette dernière décennie. L'évolution des vents à l'intérieur de l'île est très mal connue quantitativement.

Les mesures de l'évaporation et de l'humidité relative sont également insuffisantes pour bien cerner la répartition de ces paramètres sur l'île. Certains postes fournissent des résultats douteux (les valeurs ne sont pas publiées régulièrement par la Météorologie Nationale).

Les seuls paramètres relativement bien connus sur l'île sont donc, outre la pluviométrie, l'insolation et la température.

Un lysimètre a été suivi par l'I.R.A.T. (Institut de Recherche en Agronomie Tropicale) en 1970 et 1971 par LOYNET [12] qui, à cette occasion, a effectué une étude comparative entre différentes méthodes.

Ont été mesurées et calculées conjointement à la station bioclimatologique de Mon Caprice (altitude 260 m), à pas de temps décadaire, :

- l'ETP mesurée d'une graminée fourragère, par évapotranspiromètre régulièrement arrosé,
- l'ETP calculée par la formule de Turc,
- l'ETP calculée par la formule du Piche corrigé (Bouchet), détermination conjointe du coefficient de correction,
- l'évaporation par bac type de classe A.

La comparaison montre un coefficient de corrélation de l'ordre de 0,75 pour les trois méthodes empiriques par rapport à la valeur mesurée. Exprimées en évaporation journalière (mm/j), ces équations s'écrivent :

$$ETP_{\text{mesurée}} = 1,12 \times ET_{\text{piche}} - 0,69$$

avec $f = f(T_n - T_d)$ écart entre température minimum et point de rosée

* Ces stations enregistrent quotidiennement, parfois en continu : la pluviométrie, la température, l'insolation, la vitesse et la direction du vent, l'humidité relative, l'évaporation bac de classe A et évaporomètre Piche.

$$\begin{aligned} \text{ETP}_{\text{mesurée}} &= 1,17 \times \text{ET}_{\text{Turc}} + 0,12 \\ \text{ETP}_{\text{mesurée}} &= 0,63 \times \text{ET}_{\text{bac}} + 1,12 \end{aligned}$$

La valeur moyenne de l'ETP est de l'ordre de 5 mm/jour, soit 1825 mm dans l'année, avec un minimum en juin-juillet (≈ 3 mm/jour), les valeurs maximales supérieures à 6 mm/jour intervenant d'octobre à avril. Mais il ne s'agit là que d'une étude ponctuelle réalisée sur deux années dont les résultats sont donnés à titre indicatif.

1.3. Conclusion : méthode adoptée

En vue d'une étude globale sur l'ensemble de l'île de La Réunion, nous préférons choisir une méthode peut-être moins précise ponctuellement que telle autre, mais dont les données disponibles limiteront l'extrapolation dans l'espace, et par là, l'erreur dans les zones particulièrement deshéritées en postes de mesures (nous préférons une erreur possible de 10 à 20 % sur chaque maille de l'île qu'une précision de 5 % en 3 points et l'incertitude la plus grande concernant le reste de l'île).

Il n'y a pas de lysimètres actuellement en service à La Réunion, les bacs de classe A sont pour la plupart d'installation récente, leur répartition est assez limitée, ils n'intègrent pas les processus biologiques de transpiration des végétaux. Les mêmes défauts concernent l'évaporomètre Piche où de plus le dispositif d'installation peut être à l'origine d'une grande dispersion des résultats.

Nous nous sommes donc tournés vers les formules purement empiriques basées uniquement sur des paramètres climatiques. Faute de mesures systématiques du vent, nous n'avons pas utilisé la formule de Penman, ni de Blaney Criddle ; la formule de Thornthwaite qui ne tient compte que de la température, paraît inadaptée.

Nous avons en définitive utilisé la formule de Turc donnant des valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à partir de la température moyenne et de l'insolation de la période considérée.

Ces valeurs d'ETP seront ensuite confrontées à la pluviométrie, selon la méthode du bilan hydrologique défini par Thornthwaite.

Cette méthode fait intervenir une réserve en eau du sol, réservoir tampon où les plantes trouvent une ressource en eau en cas de défaillance des pluies ; ce réservoir est éventuellement saturé par les pluies excédentaires postérieures.

Ce bilan effectué période par période donne ainsi des valeurs d'évapotranspiration réelle et de pluies efficaces.

Les autres méthodes d'évaluation de l'ETP ne seront pas pour autant totalement négligées, les résultats obtenus servant à mieux évaluer la validité et la précision de la méthode employée. Différentes valeurs de la réserve en eau du sol seront également testées, en notant leur incidence sur la pluie efficace.

2. ETUDE DE LA REPARTITION DE LA TEMPERATURE A LA REUNION

2.1. Critique des données

43 postes ont fonctionné pendant la période 1971-1981 (voir 1re partie, § 3), mais 12 ont été arrêtés en cours de période, et 4 ont été ouverts après 1971. Seulement 4 postes possèdent une série complète d'enregistrement et 13 présentent moins de 5 % de lacunes.

Dans un premier temps, nous éliminons les postes ayant fonctionné moins de 5 années pour retenir 37 postes. Les coefficients de corrélation linéaire établis à partir des valeurs mensuelles de ces différents postes laissent espérer une bonne estimation des valeurs manquantes : la station de Bellecombe est la seule à présenter des coefficients de corrélation inférieurs à 0,95 avec tous les autres postes.

Nous éliminons les stations ayant plus de 30 % de lacunes ; il reste 30 postes thermométriques.

2.2. Estimation pour les valeurs manquantes

Nous estimons les valeurs manquantes par régressions multiples entre la station considérée et ses voisines, les lacunes subsistantes sont ensuite approchées par régression linéaire simple (annexe III.1).

Pour le choix des stations "explicatives", nous avons tenu compte de la proximité des stations, mais aussi de leur coefficient de corrélation linéaire, il n'y a pas de relation simple entre ces deux grandeurs (une station n'est pas d'autant mieux corrélée qu'elle est plus proche), d'autres facteurs, comme l'altitude, jouent également.

L'estimation de ces valeurs présente, même dans les cas les plus défavorables, des risques d'erreur assez limités (annexe III.1).

2.3. Distribution mensuelle des températures

La distribution mensuelle des températures est assez uniforme sur l'ensemble de l'île (fig. III.1) ; un mois plus chaud ou plus froid que la normale de ce mois l'est en général uniformément sur toute l'île (année 1974 plutôt froide, mars 1980 plutôt chaud).

Cette distribution présente pour toutes les stations des fluctuations très saisonnalisées avec un maximum en été (janvier-février) et un minimum en hiver (juillet-août) (fig. III.1). L'amplitude annuelle est de 5 à 6°C.

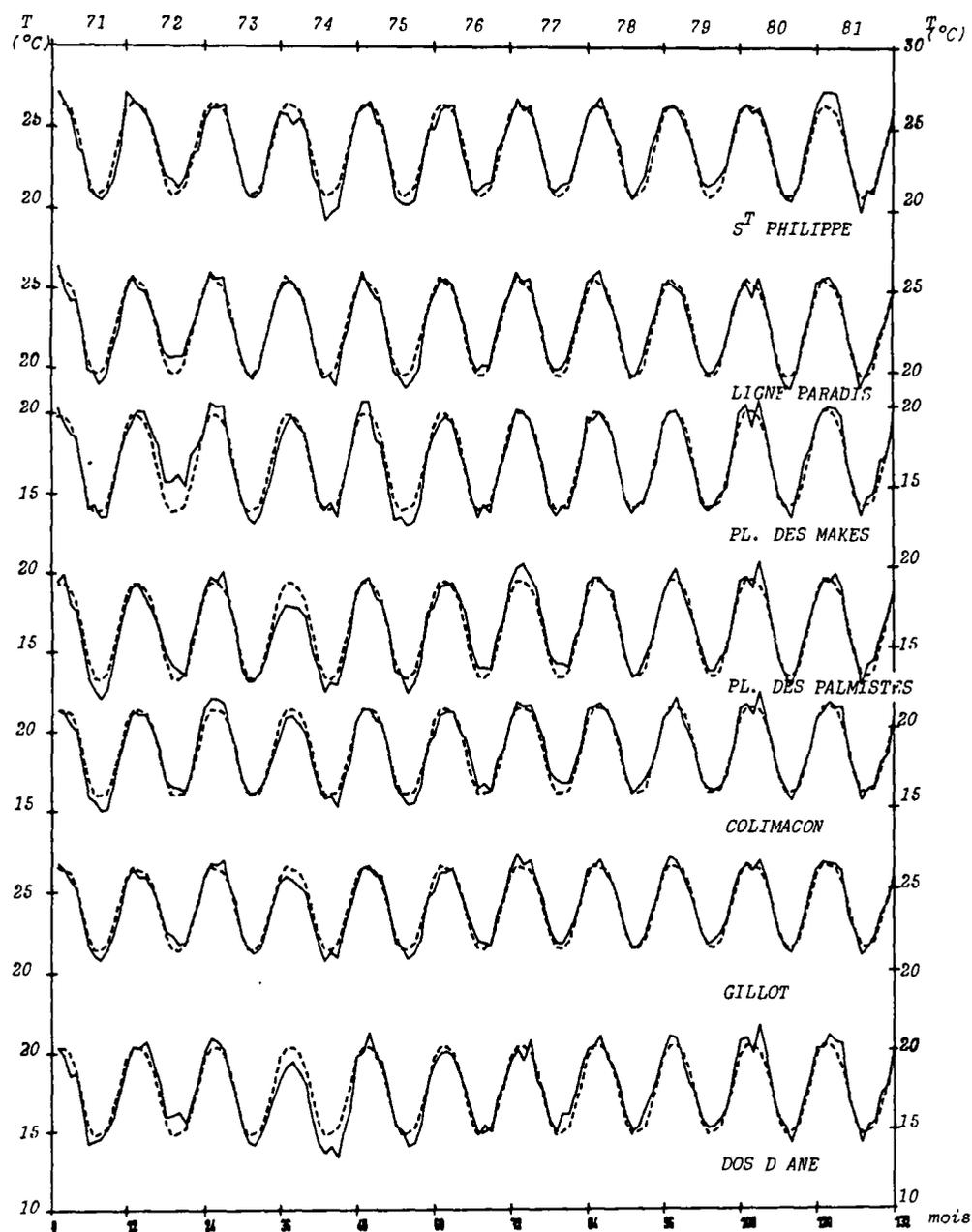


FIG. III.1 - Température mensuelle 1971-1981 à 7 stations de l'île
Comparaison à valeur moyenne interannuelle

2.4. Répartition spatiale - Relation avec l'altitude

2.4.1. Etude sur les valeurs moyennes interannuelles

A partir des moyennes mensuelles interannuelles de 27 postes, nous testons les régressions linéaires entre la température moyenne et l'altitude (annexe III.1).

Si au cours de l'année, les coefficients de corrélation et les gradients de température évoluent peu ($r \approx 0,98$, $a \approx 0,66^\circ/100$ m), la variation du coefficient b de la régression linéaire justifie l'approche mensuelle.

L'étude par tranches d'altitude ou par secteur géographique ne montre que de faibles évolutions (surtout lié à la prise en compte de la seule station d'altitude très élevée, le poste de Bellecombe à 2250 m)

L'installation de nouveaux appareils dans les régions d'altitude élevée (> 1600 m) permettrait de préciser l'évolution du gradient dans ces zones. Pour l'instant, nous préférons adopter des relations globales sur l'ensemble de l'île, mais établies mensuellement pour tenir compte de la distribution temporelle des températures.

2.4.2. Etude mensuelle sur la période 1971-1981

Les coefficients de corrélation sont élevés toute l'année, légèrement supérieurs l'été que l'hiver (fig. III.2 et annexe III.1).

La variation des gradients de température (fig. III.2 et annexe III.1) est également assez faible, la plupart des valeurs sont proches de :

- $0,66^\circ\text{C}/100$ m.

L'écart est aussi important entre les valeurs d'un même mois pour différentes années, qu'entre les valeurs de deux mois quelconques:

$a = -0,615^\circ$ en janvier 1973

$a = -0,705^\circ$ en janvier 1974

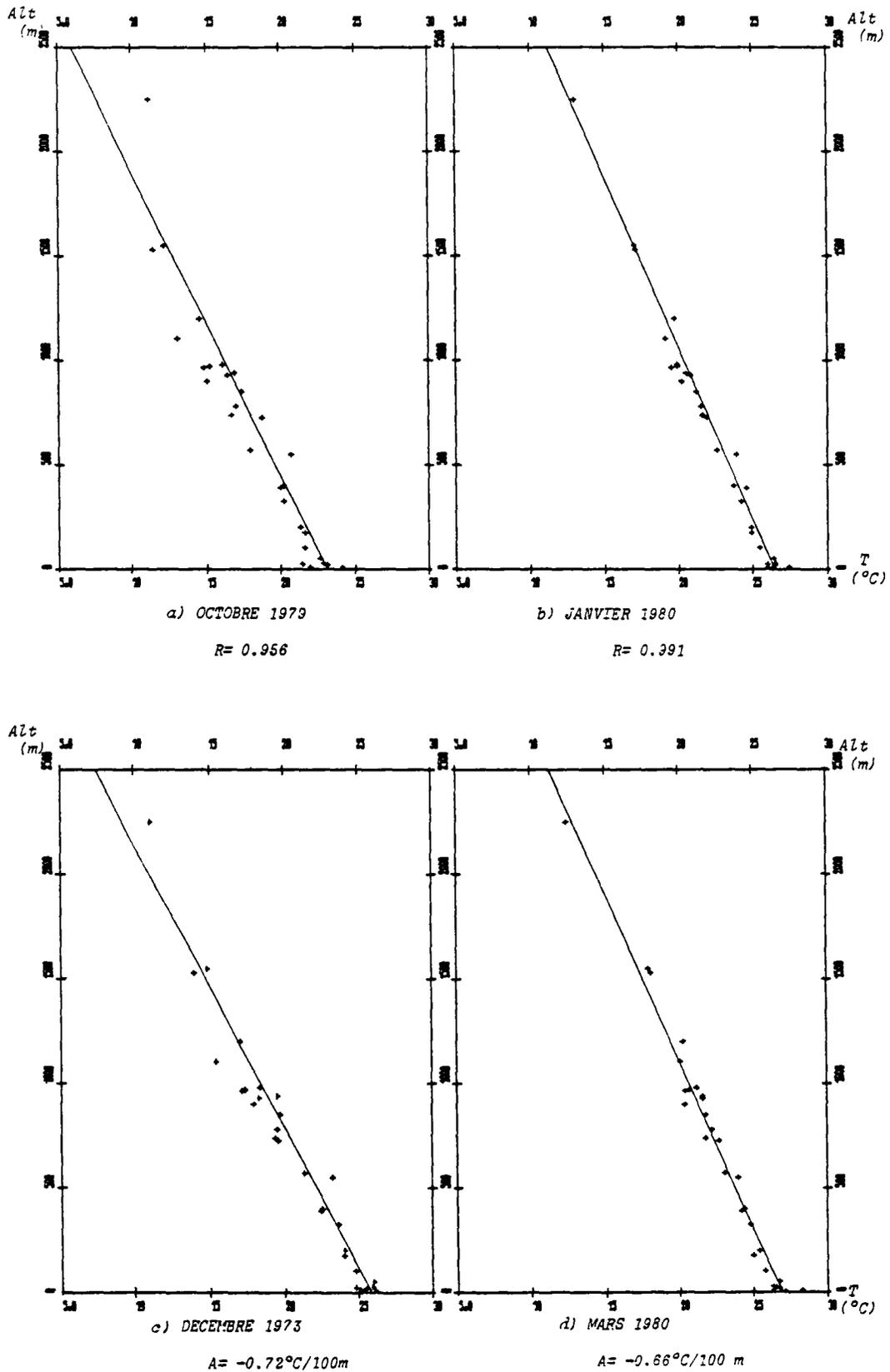


FIG. III.2 - Relation mensuelle entre la température et l'altitude
 Période 1971-1981
 Valeurs extrêmes des coefficients de corrélation (a et b)
 et des gradients (c et d)

La variation saisonnière apparaît bien sûr pour le coefficient b (correspondant à la distribution mensuelle des températures, au niveau de la mer). L'écart entre les valeurs d'un même mois de différentes années dépasse le degré ($b = 20,6^{\circ}\text{C}$ en janvier 1971 - $b = 21,7^{\circ}\text{C}$ en janvier 1972) justifiant l'étude mensuelle.

Nous estimons les valeurs des stations d'après les relations ainsi définies avec l'altitude. La comparaison entre les valeurs estimées et valeurs observées en 6 stations (fig. III,3) montre que :

- des écarts non négligeables peuvent apparaître sur les stations côtières de St-Denis et St-Pierre (écarts inférieurs au 1°C) et surtout à

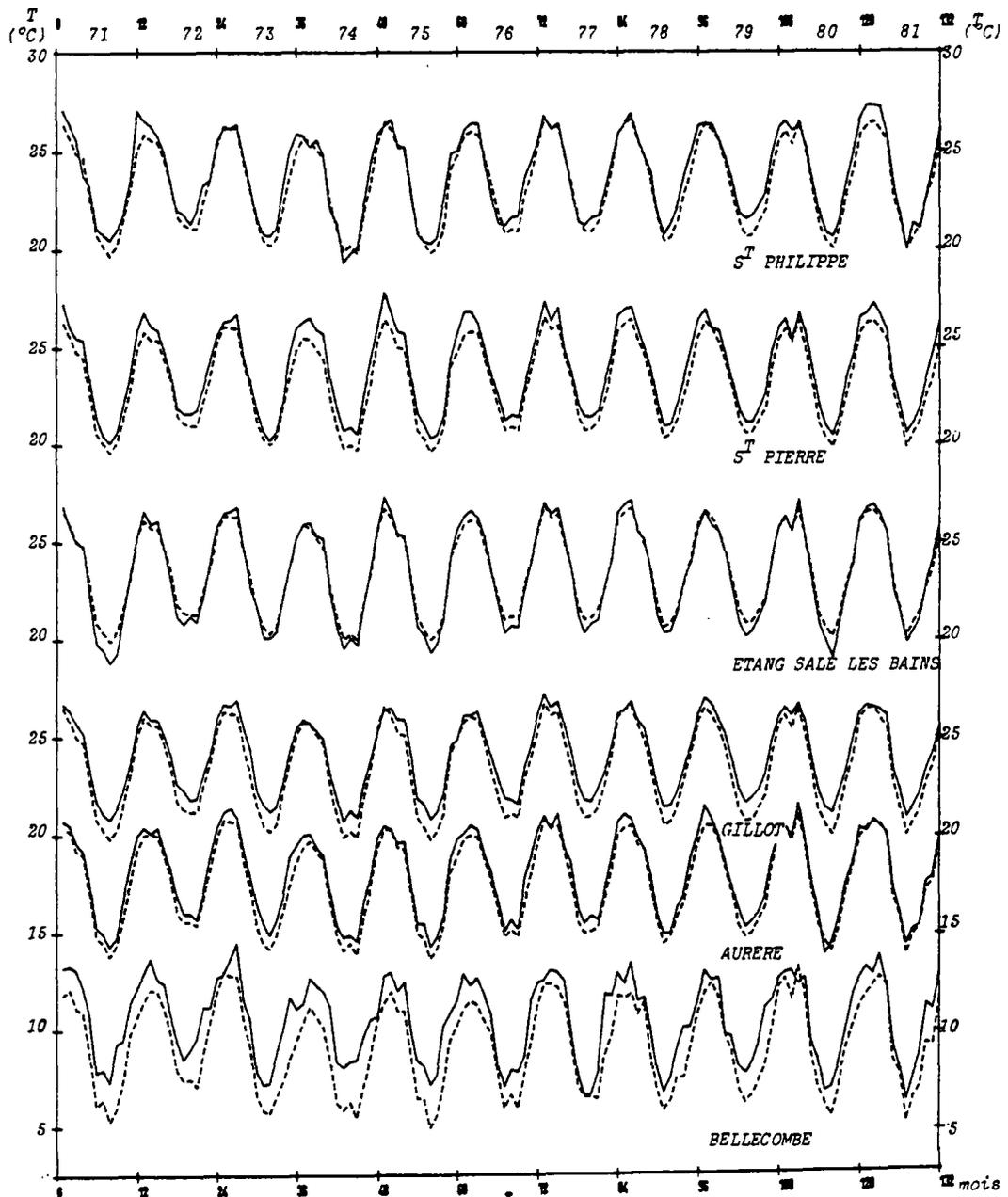


FIG. III.3 - Valeurs mensuelles de températures estimées d'après les relations linéaires établies avec l'altitude (---) comparées en 6 stations aux valeurs observées (—).

la station de Bellecombe (altitude élevée) pendant les mois de septembre et octobre (nombreux écarts atteignant 2 à 3°C),
on a choisi au préalable de ne pas privilégier cette station de situation et de valeurs de température originales,
- par contre, aux stations d'Aurère (940 m) et d'Etang Salé Les Bains, ces valeurs sont bien estimées.

2.5. Extension des données

Les coefficients de corrélation entre la température mensuelle et l'altitude étant élevés quelque soit le mois considéré ($r \approx 0,98$ et $r_{\text{minimum}} = 0,956$), nous nous limitons à ce facteur pour expliquer la variation spatiale de la température à La Réunion.

Seul le poste de Bellecombe est nettement sous-évalué par application des relations établies avec l'altitude, et il semble en effet que le gradient, pour certains mois, décroisse au dessus de 1000-1500 m (fig. III.2). L'installation de nouvelles stations en altitude permettrait de préciser ce comportement.

Faute de ces éléments complémentaires, nous préférons conserver mensuellement la relation établie avec l'ensemble des postes, même pour les mailles d'altitude élevée, plutôt que d'accorder une importance prépondérante aux données de Bellecombe : ceux-ci peuvent être dus à une situation privilégiée (effet d'abri local, dérive de l'appareil...).

L'affectation d'une valeur moyenne de l'altitude en chaque maille est réalisée manuellement (annexe III.1). Les 132 relations mensuelles sont appliquées à chacune des mailles en fonction de l'altitude ainsi déterminée.

3. ETUDE DE LA REPARTITION DE L'INSOLATION

3.1. Critique des données

17 stations ont mesuré l'insolation durant la période 1971-1981, mais la station de Cambaie fermée en 1975 ne compte que 45 enregistrements mensuels sur 132 ; nous l'éliminons de l'étude.

Les postes du Port et de Piton St-Leu ouverts en cours de période compte 30 % de lacunes, les autres stations en ont moins de 20 %.

3.2. Restitution des valeurs manquantes

Les coefficients de corrélation obtenus à partir des stations voisines sont moins élevés que ceux établis pour les précipitations ou la température ; la plupart n'atteint pas 0.8. Tenant compte de ces valeurs, de la proximité et du nombre de lacunes des stations explicatives, nous obtenons malgré les différentes combinaisons envisagées des équations donnant des résultats assez médiocres (annexe III.2) : les coefficients de corrélation multiple, bien que supérieurs à 0,8, dépassent rarement 0,9 et aucun n'atteint 0,95.

Même si le risque d'erreur est assez élevé lors de l'estimation des valeurs manquantes, nous préférons, vu le nombre réduit de stations, appliquer les relations obtenues, même aux stations présentant de nombreuses lacunes plutôt que d'éliminer ces postes, et 16 stations sont finalement retenues.

3.3. Répartition spatiale de l'insolation

3.3.1. Traits généraux

L'insolation est un paramètre variable à La Réunion : la moyenne annuelle varie du simple au double (fig. III.4) entre la station de Petite France (inférieur à 1400 h) dans les Hauts de l'Ouest, et les stations côtières (près de 3000 h à St-Pierre). Les stations situées dans le secteur central de l'île, d'altitude assez élevée, ont des valeurs intermédiaires (environ 2400 h à Bellecombe).

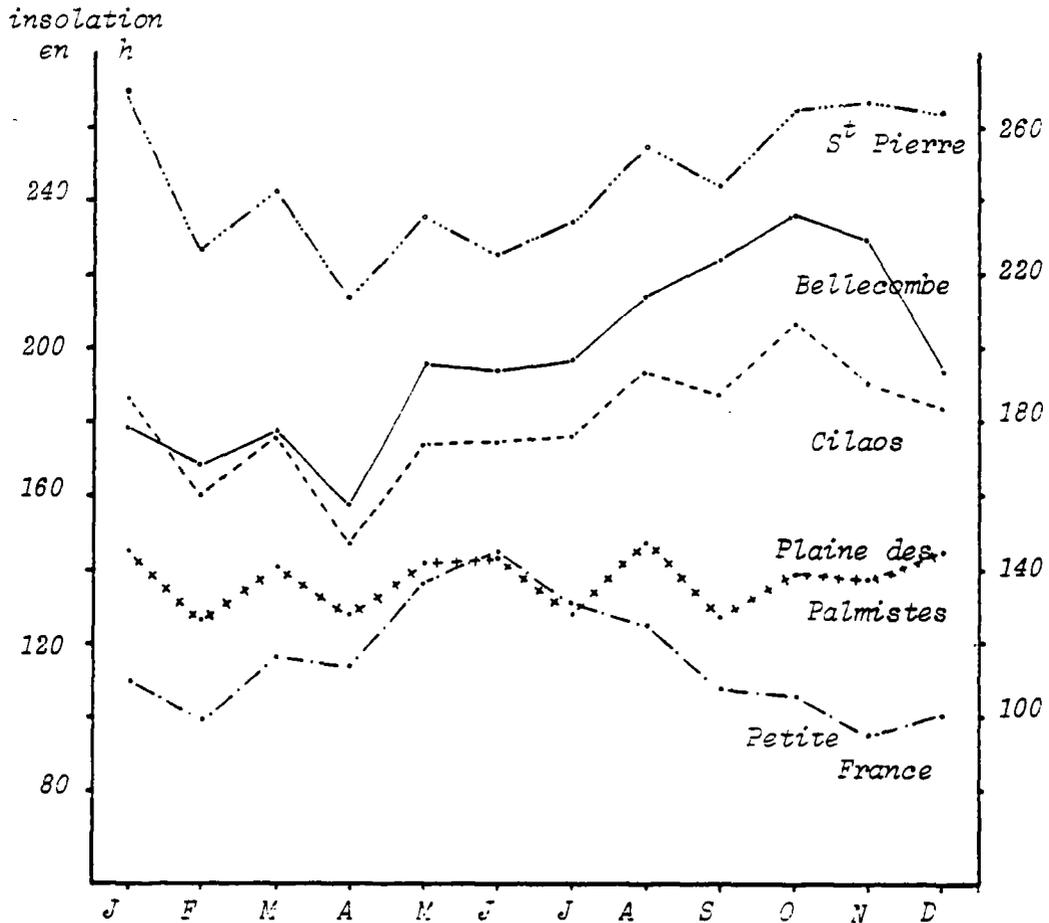


FIG. III.4 - Distribution des valeurs moyennes mensuelles d'insolation à 5 stations de La Réunion

La distribution mensuelle est très irrégulière (fig. III.5 et annexe III.2). A ce profil, en dents de scie peut se sur-imposer dans certains secteurs un mouvement d'amplitude saisonnier.

Les stations littorales et du secteur au vent ont un profil assez plat, 20 h d'amplitude sur les valeurs moyennes entre les mois plus ensoleillés et moins ensoleillés à la Plaine des Palmistes. Vers St-Pierre, une opposition apparaît sur les saisons intermédiaires, avec un minimum en fin d'été (avril-mai) et un maximum en fin d'hiver (octobre à décembre) (fig. III.4).

Les stations du centre de l'île présentent un maximum en fin d'hiver, souvent centré sur octobre, et un minimum en fin d'été (avril). Ce phénomène est très marqué à la station de Bellecombe : octobre approche 240 h d'insolation moyenne mensuelle, alors qu'avril n'atteint pas 160 h (fig. III.4).

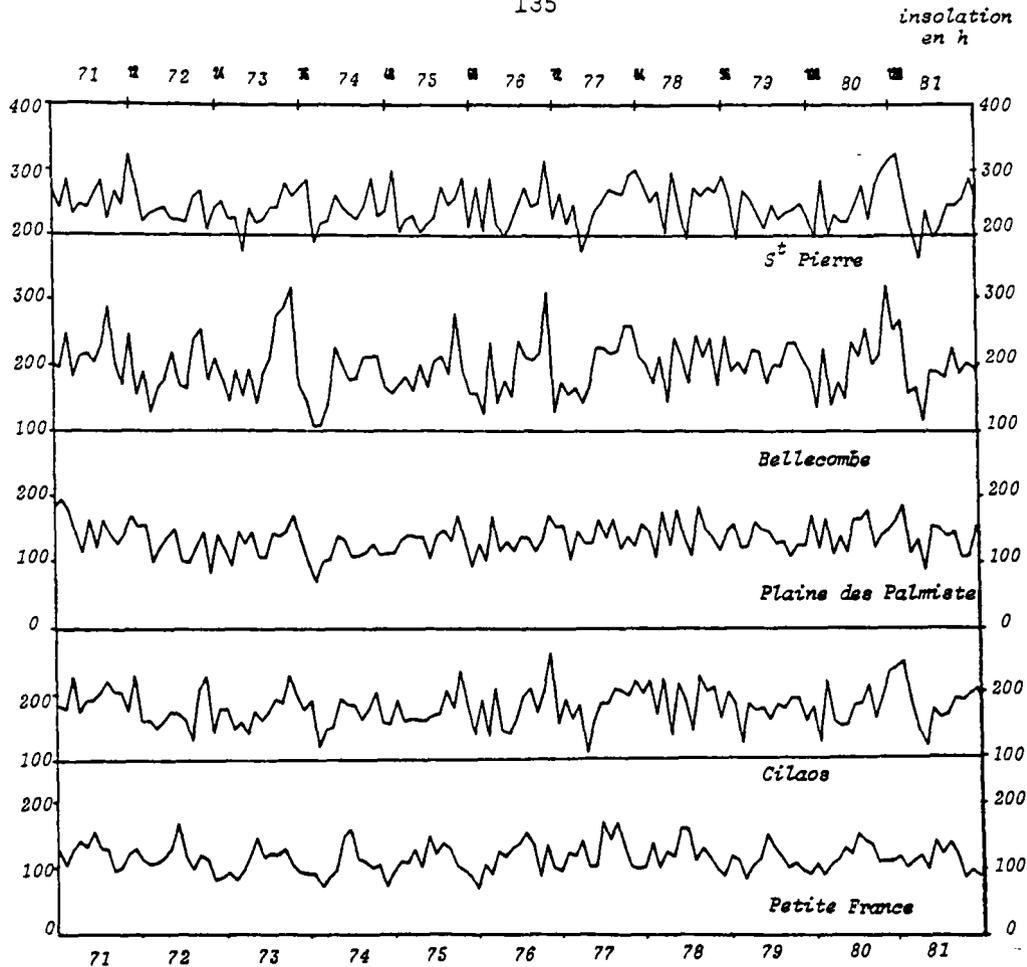


FIG. III.5 - Distribution mensuelle de l'insolation

Les stations des hauts de l'ouest, comme Petite France, présentent un maximum, alors que la durée astronomique du jour est la plus courte au mois de juin ; un minimum peu marqué apparaît de novembre à février, les développements nuageux étant alors très fréquents surtout l'après-midi.

Au niveau global de l'île, il n'apparaît pas de caractère saisonnier dans la distribution mensuelle de l'insolation, contrairement à ce qui a été observé pour les précipitations ou la température. Il n'apparaît pas non plus de relations générales simples entre la répartition spatiale de ces différents paramètres comme le montre la comparaison de leurs différents modules interannuels aux stations retenues.

TABLEAU III.1 - Valeur moyenne interannuelle de pluviométrie, température et insolation aux 16 stations retenues - Stations classées selon le module croissant de l'insolation.

Indice des stations	Moyennes Interannuelles		
	Insolation (en h)	Température (en °C)	Pluviométrie (en mm)
332	1397	15.3	1708
435	1519	16.8	2275
402	1582	13.3	1614
397	1656	16.4	4549
391	1731	18.7	1589
485	2001	18.4	1700
394	2160	16	2108
287	2266	22.5	3869
446	2317	13.5	2273
458	2373	10.6	5164
633	2380	21.3	1248
492	2456	22.9	1007
235	2678	24	1758
514	2694	22.8	1254
260	2728	25	717
544	2945	23.9	1116

Il n'a pas semblé utile de poursuivre sur cette voie peu prometteuse.

3.3.2. Relation avec l'altitude

La forte insolation sur la côte et en altitude laisse supposer une mauvaise relation linéaire avec l'altitude. Effectivement, les coefficients de corrélation sont légèrement supérieurs l'été que l'hiver, mais n'atteignent que rarement 0,7 (annexe III.2).

Nous avons représenté (fig. III.6) la moyenne interannuelle d'insolation en fonction de l'altitude pour les 16 stations retenues. Pour les postes d'altitude inférieure à 1000 m, la plupart des points peuvent s'ajuster sur une droite (décroissance de l'insolation d'environ 140 h pour 100 m d'élévation en altitude), quoiqu'il y ait une assez forte dispersion dans la tranche 0-200 m.

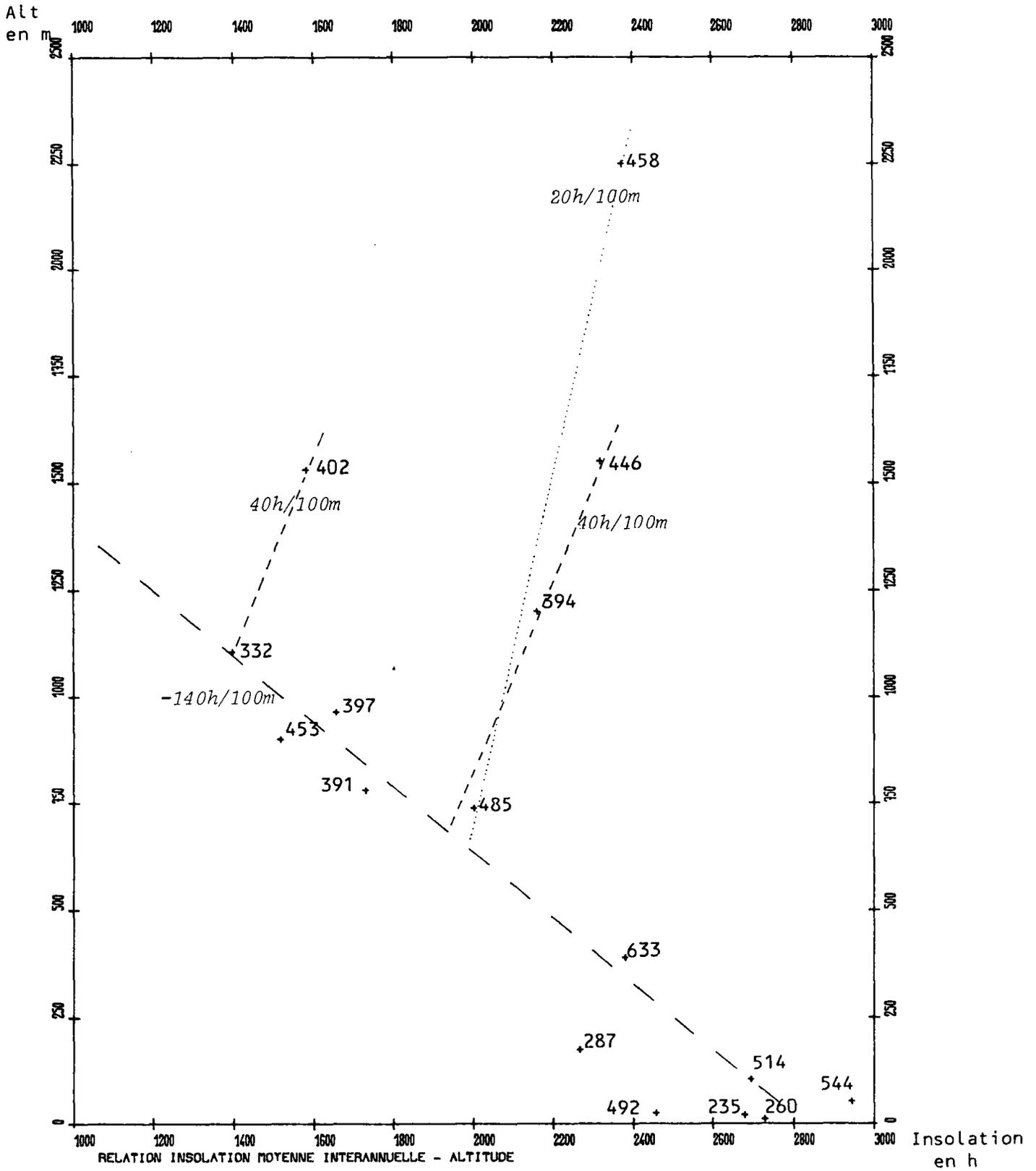


FIG. III.6 - Relation entre l'insolation moyenne interannuelle et l'altitude

Par contre au dessus de 1000 m, les cinq stations donnent des valeurs très dispersées. Dans la zone 1000-1600 m, les 4 stations peuvent se regrouper 2 par 2, les Hauts de l'Ouest d'une part, les stations centrales de l'île d'autre part (Cilaos et la Plaine des Cafres), un écart de près de 800 h sépare ces deux groupes de stations qui déterminent chacun un gradient apparent d'environ +40 h/100 m.

Le poste du Tampon, la Plaine des Cafres et Bellecombe déterminent un gradient d'environ + 25 h/100 m. Ainsi deux secteurs s'individualisent en altitude sur la côte sous le vent ; nous n'avons aucun élément par contre sur la côte au vent. Même près de la côte, les secteurs de Menciol (côte au vent) et Etang Salé (côte sous le vent) sont nettement moins ensoleillés que les autres stations côtières.

Il ne paraît pas possible alors de restituer l'insolation sur l'ensemble de l'île à partir de la corrélation entre ce paramètre et l'altitude. Nous retiendrons cependant : le minimum d'insolation semble se situer vers 800-1500 m (minimum mesuré à Petite France : 1105 m), altitude probable du plafond nuageux une bonne partie de l'année* :

Ce couvert nuageux est d'extension et d'altitude variable ; sur la côte sous le vent, s'individualisent nettement la zone des Hauts de St-Gilles - Planeze du Grand Bénard, et celle du cirque du Cilaos - Plaine des Cafres.

L'installation toute récente d'héliographes dans les cirques de Mafate et Salazie va apporter des enseignements sur ces secteurs. Pour mieux appréhender la répartition globale sur l'île (relation secteur par secteur avec l'altitude), de nouveaux postes sont nécessaires sur les hauts de la côte au vent (Roche Ecrute, Takamaka, Rivière de l'Est par exemple), ainsi que sur le littoral du Volcan et la région de St-Gilles.

N'ayant pu mettre en évidence des relations globales entre l'insolation et d'autres paramètres tant climatiques que physiques, et devant les bons résultats obtenus sur la pluviométrie par l'analyse en composantes principales (voir 2me partie, § 4.), nous effectuons une étude semblable sur ce facteur.

* Ce phénomène est bien connu des aviateurs et randonneurs qui voient souvent les sommets de l'île émerger d'une mer de nuages.

3.3.3. Analyse en composantes principales

L'ensemble de valeurs est assez homogène : écart de 1 à 2 entre les valeurs moyennes interannuelles extrêmes des différentes stations (annexe II.4.5.), coefficient de variation (quotient de l'écart-type sur la moyenne) qui n'excède que rarement 20 % pour les différentes stations ; il n'est pas utile de travailler sur les variables profilées.

Nous choisissons de travailler sur la matrice de corrélation (variables centrées réduites) et de rechercher les 4 premières composantes principales (annexe III.2).

Ces composantes expliquent 87 % de la variance totale et les coefficients de corrélation totale des stations vis à vis des composantes varient de 0,86 à 0,95.

La répartition géographique des coefficients de corrélation vis-à-vis de chaque composante n'est pas très régulière, et ne semble pas toujours interprétable comme schématisant des différences de comportement essentielles entre les stations.

L'incertitude subsiste de ce fait dans les zones dépourvues de postes (secteur de Mafate, Salazie, Roche Ecrute, littoral du Piton de la Fournaise). Par contre sur le secteur sous le vent, la relative densité des postes permet d'espérer une bonne appréciation de l'insolation. L'A.C.P. rend bien compte de la distribution mensuelle très irrégulière de ce paramètre ; la restitution dans les temps est assez fidèle pour des stations de comportement très différent, telles Petite France, St-Pierre et Bellecombe (fig. III.7).

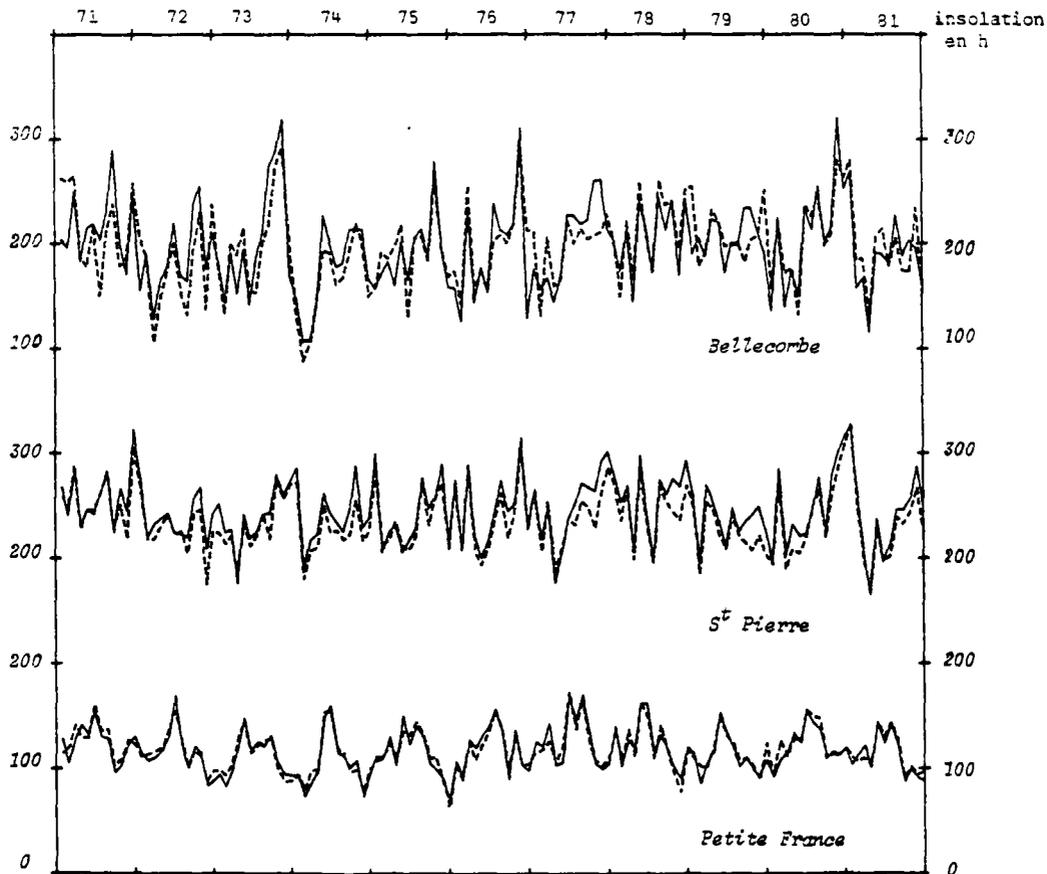


FIG. III.7

Insolation mensuelle restituée par application des résultats de l'ACP comparée à l'insolation mesurée

3.3.4. Extension dans l'espace

Nous avons suivi la même démarche que pour la pluviométrie (voir 2^{me} partie, § 5). Pour l'affectation des différents coefficients à chacune des mailles, nous avons utilisé le même programme d'interpolation. Les facteurs limitants (nombre minimal de stations à prendre en compte, rayon maximal de recherche) sont, en fonction du nombre total et de la répartition des stations, choisis respectivement à 2 et 8. Cette méthode ne tient compte que de la distance des stations vis-à-vis des mailles et non de leur contexte géographique respectif : la zone côtière de l'Ouest (région de St-Gilles) est ainsi fortement influencée par les postes des hauts de ce secteur (Petite France, Trois Bassins), ce qui conduit à une sous-évaluation manifeste dans cette région ; nous y avons alors corrigé les résultats de l'interpolation automatique.

Autre région où les résultats sont certainement très discutables, la façade littorale du Piton de la Fournaise auquel on a affecté des valeurs homogènes. Aucune mesure ne permettant d'établir une éventuelle distribution en fonction de l'altitude dans cette région, le littoral vers St-Benoît - Ste-Rose est aussi certainement sous-évalué par l'influence du poste de la Plaine des Palmistes.

3.4. Conclusions

Devant le nombre et la répartition des postes, il paraît évident que de nombreuses imprécisions demeureront quelque soit la méthode envisagée. Si l'extension dans l'espace reste discutable en l'absence de mesures (aucun élément ne permet cependant de quantifier l'erreur éventuelle), la restitution dans le temps est opérée de manière satisfaisante (fig. III.7) par la méthode employée. Le minimum d'insolation correspond aux tranches d'altitude moyennes (800 à 1500 m) sur la côte sous le vent.

Qu'en est-il sur la façade au vent de l'île où justement les pôles de pluviométrie maximum correspondent à cette tranche d'altitude ?

L'installation de nouveaux héliographes devraient permettre de mieux cerner la répartition spatiale de l'insolation, de préciser la position moyenne du plafond nuageux (lié à l'inversion des gradients d'insolation) de quantifier par secteur, voire par mois, des gradients locaux d'insolation.

Les analyses les plus fines pourraient alors être envisagées :

- tester à une échelle très locale des relations simples entre l'insolation et d'autres paramètres climatiques (pluviométrie notamment),
- étudier l'évolution horaire comparée du couvert nuageux, de la température, de la pluviométrie, de l'hygrométrie, au cours de la journée afin d'essayer de comprendre les processus générateurs de nuages.

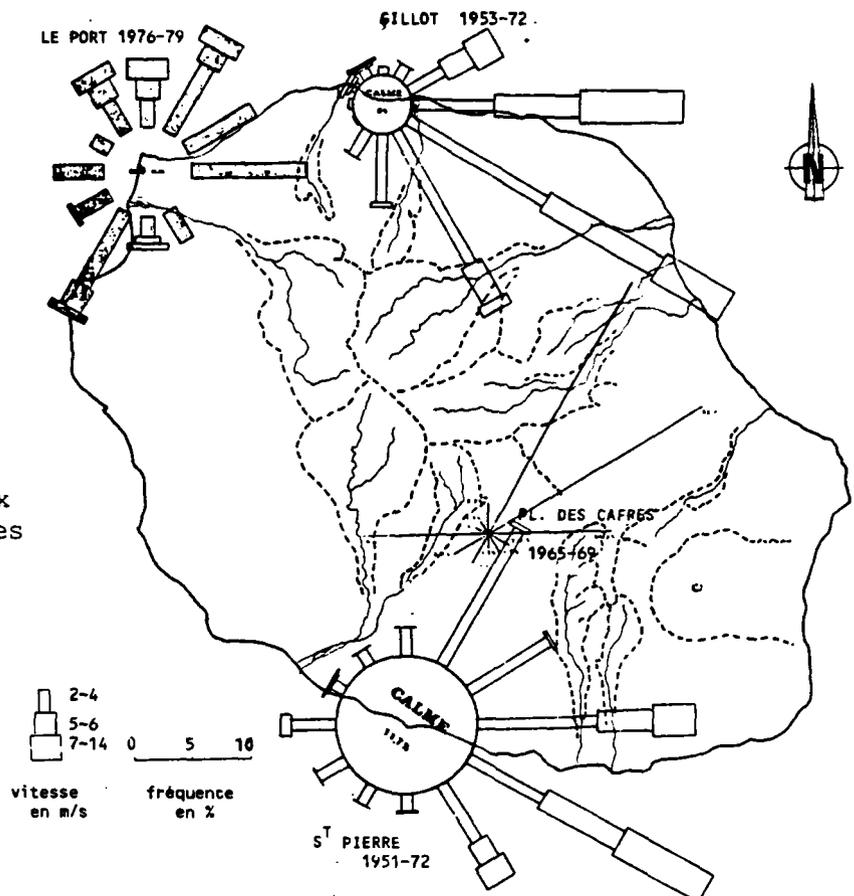
4. ETUDE DE LA REPARTITION DES AUTRES FACTEURS CLIMATIQUES A LA REUNION

Les autres facteurs climatiques sont mesurés en un nombre restreint de stations (voir 1^{re} partie, § 2), et il est incertain de tenter une extension de ces valeurs à l'ensemble de l'île. Ils interviennent cependant dans les phénomènes d'évapotranspiration et nous dégageons quelques caractéristiques générales des mesures effectuées sur chacun de ces facteurs.

4.1. Le Vent

Les roses des vents en chacune des 4 stations mesurant ce paramètre illustrent assez bien le rôle prépondérant de l'alizé (fig. III.8). Selon sa direction prédominante, secteur S.E., il affecte surtout les stations de St-Denis et St-Pierre. Pour accéder à la Plaine des Cafres, il s'engouffre entre les deux volcans par la Plaine des Palmistes et prend ainsi une direction N.E., il atteint alors également St-Pierre. La région du Port est la plus abritée ; elle ne reçoit que des composantes de l'alizé qui ont contourné l'île auxquelles s'ajoutent les vents de mousson (secteur N.O.) et les vents d'Ouest liés aux perturbations polaires qui intéressent aussi St-Pierre.

FIG. III.8
Roses des vents aux stations synoptiques de La Réunion



Sur le littoral "sous le vent", les échanges thermiques entre Terre et Océan sont à l'origine des brises "de Terre" ou "de Mer".

Pour la plupart, ces vents soufflent à moins de 4 m/s, mais la proportion de vent de la tranche 7 à 14 m/s n'est pas négligeable : 21 % à St-Denis et 17 % à St-Pierre, liés aux alizés, 8 % au Port d'au surtout au vent de mousson. Les perturbations cycloniques peuvent être également à l'origine de vents très violents (> 100 km/h).

4.2. Humidité relative

En valeurs moyennes mensuelles, ce paramètre est assez stable à La Réunion, tant dans l'espace que dans le temps (annexe III.3) ; les valeurs moyennes annuelles des différents postes oscillent entre 72 et 83 %, l'amplitude annuelle entre l'été humide et l'hiver plus sec varie selon les postes de 3 à 8 %.

Ces valeurs moyennes masquent cependant une différence plus accentuée entre des jours humides et des jours moins humides d'un même mois qui atteint souvent de 20 à 30 %, et également une variation au cours de la journée qui se traduit par la différence entre les valeurs maximales et minimales moyennes (moyenne au niveau du mois des valeurs extrêmes journalières), cette différence est également de l'ordre de 20 à 30 %.

Nous retenons surtout que même au niveau du Port, zone la plus sèche de l'île, ces valeurs minimales ne descendent qu'exceptionnellement en dessous de 50 % (annexe III.3), les valeurs moyennes restant toujours supérieures à 60 %.

L'absence ou la faiblesse des précipitations pendant les mois d'hiver n'est guère sensible au niveau de l'humidité relative. Dans les Hauts de l'Ouest (Carreau Alfred et Colimaçons) celle-ci reste supérieure à 75 % pour des mois qui ne reçoivent pas 50 mm en moyenne. Même s'ils ne conduisent pas à des précipitations, les développements nuageux à forte humidité relative (brouillards) se forment très souvent dans ce secteur lui conférant ainsi une faible insolation (voir 3^{me} partie, § 3.).

4.3. Evaporation

4.3.1. Evaporomètre Piche

La répartition de ces valeurs paraît surtout influencée par l'altitude. Les totaux moyens annuels dépassent 1000 mm sur le littoral, ils sont inférieurs à 500 mm en altitude.

ROBERT (communication personnelle) constate une très faible évolution au cours de la journée aux postes de St-Pierre et Gillot (55 % le jour pour 45 % la nuit). Il remarque aussi une correspondance dans la distribution mensuelle entre l'évaporation et l'insolation aux différents postes.

Par contre, au niveau de la répartition spatiale, il ne semble pas exister de relation simple entre l'évaporation selon la méthode de Piche et les autres facteurs climatiques, et il n'apparaît pas possible de représenter la distribution de ce facteur sur l'île.

Certains écarts (600 mm entre St-Denis et St-Philippe à l'échelle annuelle) semblent plutôt imputables aux conditions d'installation qu'à de si importantes différences climatiques. La fermeture de nombreux postes témoigne de la difficulté d'obtenir des résultats cohérents (le Service Météorologique de La Réunion supprime les stations ayant des mesures incomplètes ou trop suspectes).

En effet, ces appareils nécessitent des conditions d'installation et d'utilisation très strictes, le type d'abri exerce notamment une forte influence sur les résultats.

Nous retenons surtout la différence très nette entre le littoral et la région centrale de l'île.

4.3.2. Bac à évaporation de classe A

Depuis quelques années, l'I.R.A.T. (Institut de Recherches en Agronomie Tropicale) a installé des bacs sur la côte ouest de l'île. Ces premiers résultats complétés des valeurs relevées par la Météorologie Nationale à Gillot et St-Pierre ont permis à AUCKENCHALLER [1] d'établir

un gradient moyen de ce paramètre en fonction de l'altitude entre 0 et 800 m sur la côte ouest. L'évaporation diminue en moyenne de 1 mm/jour tous les 200 m ($-0,4$ mm/j/100 m en hiver, et $-0,6$ mm/j/100 m en été).

Les valeurs moyennes annuelles s'étagent ainsi de près de 2000 mm à Gillot (21 m) à moins de 850 mm à Colimaçon (altitude : 750 m).

L'installation d'un bac à Petite France (1530 m) permettra de suivre l'évolution du gradient avec l'altitude. L'extrapolation du gradient actuel conduit à l'annulation de l'évaporation à partir de 1200 m ?! La station de la Plaine des Cafres (1550 m) donne au contraire des valeurs élevées, elle n'a pas été retenue dans l'étude de l'I.R.A.T.

Nous ne possédons les valeurs mensuelles sur 10 ans que pour la station de Gillot. Contrairement à l'évaporation du Piche, la distribution mensuelle présente une répartition saisonnière très marquée avec un maximum en décembre-janvier (200 mm) et un minimum en juin-juillet (< 130 mm) fig. III.9). Les valeurs mensuelles de l'évaporation Bac sont ainsi nettement supérieures à celles de l'évaporation Piche pour les mois d'été, conduisant sur les valeurs annuelles à un écart de 400 mm.

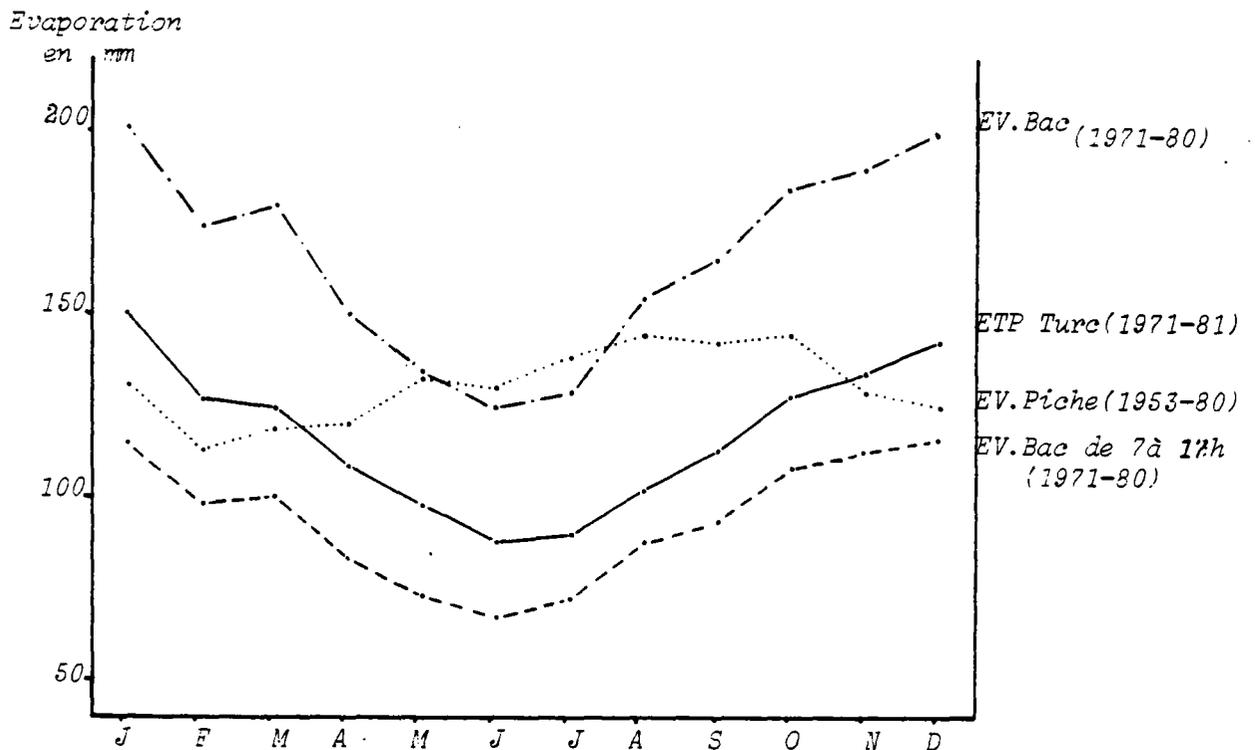


FIG. III.9 - Distribution des valeurs moyennes mensuelles de différents indices d'évaporation à la station de Gillot

Ces différentes valeurs d'évaporation ne sont pas assimilables à l'évapotranspiration. Elles donnent cependant des valeurs indicatives. A l'image de la température et l'insolation, elles diminuent avec l'altitude dans la zone de 0 à 1000 m

5. ETUDE CRITIQUE DE L'ETP CALCULEE PAR LA FORMULE MENSUELLE DE TURC

5.1. Distribution spatiale et temporelle de l'ETP sur la période 1971-1981

Nous avons donc appliqué maille par maille et mois par mois la relation établie par TURC définissant l'ETP mensuelle à partir des valeurs correspondantes de la température, de l'insolation (et de l'humidité relative) (annexe III.4).

La répartition de la valeur moyenne interannuelle de ce facteur (fig. III.10) montre bien le rôle prépondérant joué par la température : la répartition de l'ETP est en premier lieu commandée par l'altitude (1400 mm sur le littoral, région de St-Denis et St-Pierre ; inférieure à 1000 mm à partir de l'altitude 1000-1500 m, de l'ordre de 800 mm sur les sommets).

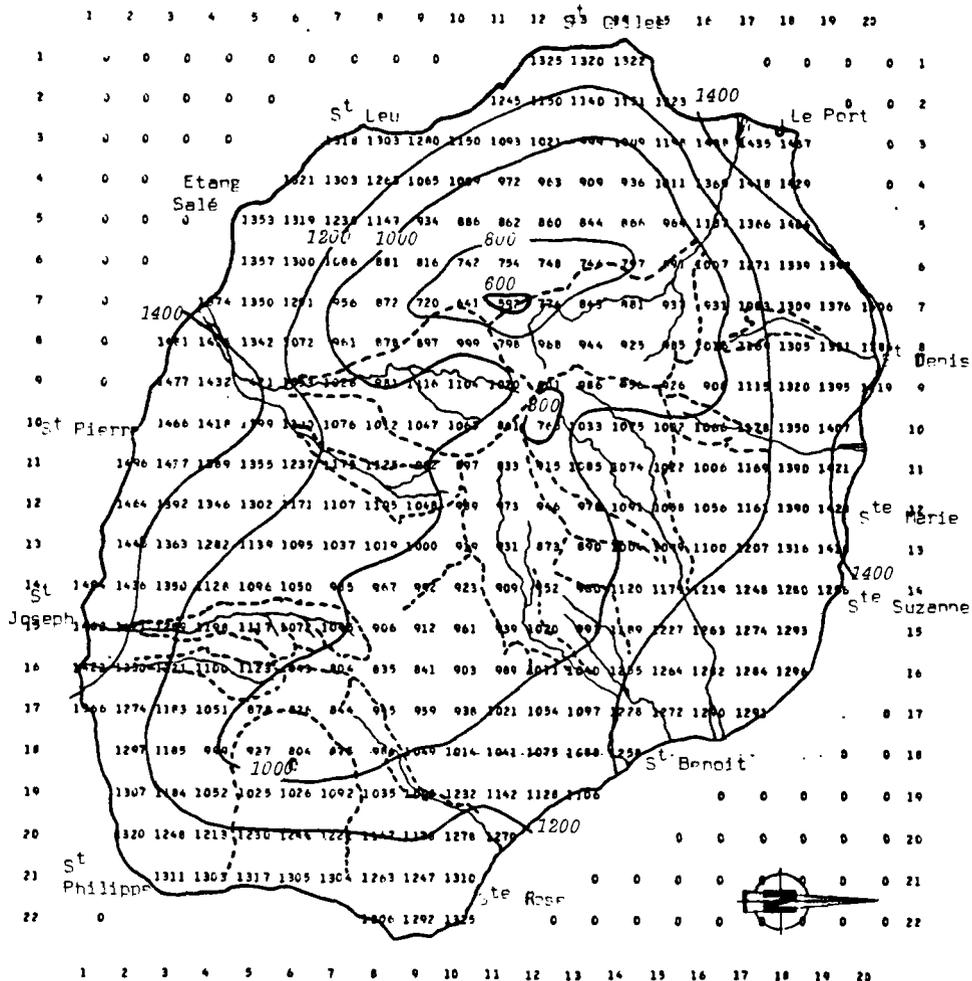


FIG. III.10 - Distribution spatiale de l'ETP - Valeur moyenne inter-annuelle 1971-1981 en mm

L'insolation intervient surtout dans la région de la plaine du Grand Benard (Hauts de l'Ouest). Les plus faibles valeurs de l'ETP (600 à 800 mm) correspondent à ces régions d'insolation minimale. Ce facteur individualise aussi différents secteurs dans les zones d'altitude (et température) équivalentes. L'ETP est ainsi plus élevée à St-Pierre qu'à St-Gilles, conformément à la différence d'insolation entre ces postes.

Cette distribution est relativement constante dans le temps : quelque soit le mois considéré, la température et l'insolation gardent une répartition spatiale assez proches de leurs valeurs moyennes respectives.

Si nous considérons les moyennes pondérées au niveau de l'ensemble de l'île, nous retrouvons dans la distribution des moyennes mensuelles interannuelles, l'influence de la température et de l'insolation (tableau III.2).

TABLEAU III.2 - Valeurs moyennes interannuelles pondérées au niveau de l'île (moyenne des différentes mailles)

	Température (°C)	Insolation (h)	ETP (mm)
Janvier	20.3	185.6	115.9
Février	20.6	162.	102.
Mars	20.4	177.5	101.6
Avril	19.5	160.4	85.9
Mai	17.7	184.4	76.8
Juin	15.9	182.4	69.7
Juillet	15.	179.3	68.2
Août	15.	192.4	79.
Septembre	15.4	177.6	87.7
Octobre	16.8	187.6	100.6
Novembre	18.3	182.1	109.7
Décembre	18.9	182.6	113.4
Année	17.9	2153.9	1110.5

La distribution mensuelle et l'amplitude saisonnière marquée de la température se trouvent à l'origine des variations de l'ETP au cours

de l'année. L'insolation qui varie peu d'un mois à l'autre (160.4 h en avril et 192. h en août en sont les valeurs extrêmes), décale cependant la distribution mensuelle de l'ETP par rapport à celle de la température de 1 à 2 mois. Le minimum intervient en juin-juillet (inférieur à 70 mm) le maximum correspond au mois de novembre à janvier (≈ 110 mm) ; le minimum de température d'août est ainsi atténué par le maximum correspondant d'insolation ; le mois d'avril peu ensoleillé se retrouve avec une ETP moyenne inférieure à celle du mois de septembre, bien que ce mois ait une température moindre de 4° .

Cette distribution mensuelle garde une allure analogue en toute maille de l'île (fig. III.11), les écarts-types associés à ces moyennes mensuelles sont faibles (coefficient de variation de l'ordre de 0,05 à 0,1).

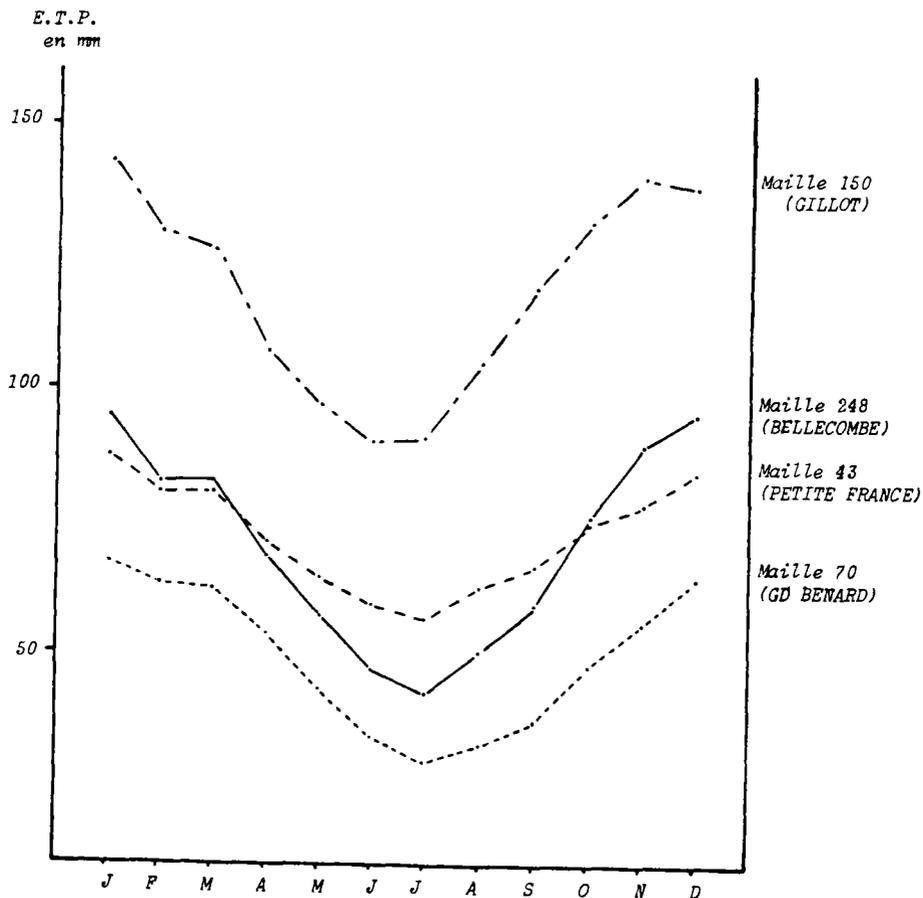


FIG. III.11 - Distribution moyenne mensuelle de l'ETP en différentes mailles de l'île - Période 1971-1981

5.2..Influence des incertitudes concernant les facteurs climatiques sur l'E.T.P.

Nous avons testé pour quelques mailles de l'île, l'influence de la variation des températures et de l'insolation sur les valeurs de l'ETP, au niveau des valeurs moyennes interannuelles, puis des valeurs mensuelles (annexe III.4).

Nous avons considéré des erreurs supérieures à celles que l'on peut raisonnablement attendre de notre étude ($\pm 20\%$ sur l'insolation, $\pm 2^\circ\text{C}$ sur la température).

Les écarts correspondants sur les valeurs d'ETP sont de l'ordre de 10% .

La variation sur l'insolation se comporte de façon assez homogène quelque soit la valeur de la température ; on note cependant un léger accroissement de l'erreur sur l'ETP avec l'augmentation de la valeur de l'insolation.

La température intervenant dans la formule de Turc par le facteur : $T/(T+15)$ exerce d'autant plus d'influence sur les valeurs d'ETP qu'elle est faible.

à $T = 25^\circ$: $T/(T+15) = 0,625$ de $T-2$ à $T+2$, $T/(T+15)$ varie de $0,605$ à $0,642$
à $T = 5^\circ$: $T/(T+15) = 0,25$ de $T-2$ à $T+2$, $T/(T+15)$ varie de $0,166$ à $0,318$.

C'est donc en altitude que l'incertitude sur l'ETP, liée à l'indétermination sur la température, est la plus grande. Et c'est effectivement dans ce secteur central de l'île que le réseau de postes thermométriques n'est pas assez développé (voir 3me partie, § 2.).

Il convient cependant de relativiser quelque peu ces chiffres, car la valeur absolue de l'ETP diminuant avec la température, l'écart absolu sur l'ETP dans ce secteur reste inférieur à 15 mm , alors qu'au poste de Bellecombe, 9 moyennes mensuelles de hauteur de pluie sont supérieures à 200 mm . Si ce n'est quelques mois d'hiver, les incertitudes absolues liées à l'interpolation spatiale des pluies seront nettement plus élevées que celles dues à l'ETP.

5.3. Comparaison à d'autres indices d'évaporation ou d'évapotranspiration

5.3.1. Comparaison à ETP mesuré

La seule étude comparative entre la mesure de l'ETP par la formule de Turc et mesure directe de l'évapotranspiration a été effectuée par LOYNET [12] à Ligne Paradis (voir 3me partie, § 1.2.). L'ETP_{Turc} sous-estime l'ETP mesurée de 20% environ. Cette étude a été réalisée au pas de temps décadaire.

5.3.2. Comparaison à l'évaporation Bac

A Gillot, les valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation Bac sont régulièrement supérieures de 50 mm environ à l'ETP Turc (cf fig. III.9), leur distribution mensuelle ayant des allures semblables. Toujours en moyenne mensuelle, l'ETP Turc est pour chaque mois supérieure à la valeur de 7 h à 17 h de l'évaporation bac de 20 à 30 mm.

Nous ne possédons pas de valeurs mensuelles aux autres stations, et les valeurs moyennes annuelles ci-dessous sont données à titre indicatif ; les périodes de référence ne coïncident pas, toutes les valeurs n'ont pas été mesurées sur les sites mêmes :

	Evaporation Bac**	ETP _{Turc}	Altitude (m)
Gillot	1990	1405	21
Ligne Paradis	≈ 1800	1416	150
Piton St-Leu	≈ 1200	1121	390
Hermitage	≈ 1270	1100*	450
Tan Rouge	≈ 1060	≈ 950*	650
Colimaçon	≈ 840	965	750

* d'après mailles voisines

** d'après AUCKENTHALER [1] et Service Météorologique de La Réunion [8]

Il apparaît cependant qu'il n'y a pas de relation simple entre ces deux grandeurs, l'évaporation Bac, supérieure sur le littoral à l'ETP Turc décroît rapidement avec l'altitude et devient inférieure vers 700 m d'altitude.

5.3.3. Comparaison à l'évaporation "Piche"

LOYNET [12] trouve des valeurs assez proches entre l'ETP obtenue à partir de la formule de Turc et celle du Piche corrigée :

$$ETP_{\text{Piche corrigée}} = \alpha \times (ETP_{\text{Piche}}) \times [1 + \lambda(\theta)]$$

où α dépend du matériel utilisé et du climat, déterminé empiriquement à la station de Mon Caprice ($\alpha \approx 0,39$)

$[1 + \lambda(\theta)]$ coefficient de correction dépendant de la moyenne entre les températures de l'air et du point de rosée.

Nous avons essayé d'appliquer cette méthode à Gillot en prenant $\alpha = 0,4$. Les valeurs obtenues sont nettement supérieures à celles de l'ETP_{Turc}, mais surtout rendent peu compte de l'amplitude saisonnière (annexe III.4).

De plus, les valeurs relevées en altitude (annexe III.3) paraissent exagérément faibles par rapport aux stations côtières (400 mm contre 1600 mm), cet écart relatif est amplifié par application de la formule du Piche corrigé $[(1 + \lambda\theta)$ diminue avec la température et donc l'altitude]. Il n'est alors pas possible d'établir une relation linéaire entre l'ETP_{Piche corrigée} et l'ETP_{Turc}.

6. CONCLUSION

Tenant compte des dispositifs de mesure en place à La Réunion, nous avons considéré que l'évaluation globale de l'évapotranspiration potentielle à La Réunion ne pouvait se concevoir que par l'application de formules empiriques basées sur des facteurs climatiques ; la température et l'insolation paraissent les seuls à posséder un réseau de mesure assez régulier sur l'île, limitant ainsi les erreurs d'extrapolation. Nous utilisons donc la formule de Turc mensuelle qui, sous différents climats du globe, s'avère un indicateur correct de l'ETP.

L'étroite liaison mise en évidence sur l'ensemble de l'île entre les températures mensuelles et l'altitude permet une extension fiable de ces données aux différentes mailles de l'île. Une incertitude de quelques degrés affecte cependant les mailles d'altitude élevée : le seul poste, d'altitude supérieure à 2 000 m, Bellecombe, n'obéit pas aux relations générales.

L'insolation, par contre, ne paraît pas se distribuer régulièrement en fonction de l'altitude. Il n'apparaît pas non plus de relation avec les autres facteurs climatiques (pluie et température). Nous utilisons les résultats d'une analyse en composante principale dont nous contrôlons la fiabilité des estimations au niveau des stations en service. Une incertitude demeure bien sûr dans les zones particulièrement deshéritées en héliographes (Hauts de la côte au Vent, littoral du Piton de la Fournaise ...).

La répartition, tant dans le temps que dans l'espace, des valeurs de l'ETP ainsi calculées par application de la formule de Turc mensuelle, témoigne du rôle prédominant joué par la température (distribution spatiale commandée par l'altitude et distribution saisonnière très nette). Des imprécisions plutôt pessimistes sur les données climatiques de température ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) et d'insolation ($\pm 20\%$) se répercutent par des incertitudes d'environ 10 % sur l'ETP qui sont le plus souvent négligeables en regard des erreurs dues à l'interpolation des hauteurs de pluie.

L'étude de LOYNET et les études comparatives effectuées en d'autres régions (voir 3me partie, § 1.1.4.), tendent à montrer que les valeurs obtenues par la formule de Turc constituent une approche par défaut de l'ETP.

Les différentes mesures d'évaporation, sans être assimilables à des mesures d'ETP, tendent à montrer une diminution très sensible de l'évaporation avec l'altitude, qui n'apparaît pas aussi nette pour l'ETP_{Turc}. La sous-estimation par application de cette relation diminuerait alors avec l'altitude, et le chiffre de 20 % souvent avancé pour chiffrer cette sous-évaluation, paraîtrait donc une approche par excès de cet écart.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AUCKENTHALER J. (1982) .- L'évaporation d'une nappe d'eau libre à La Réunion - Mesure au bac classe A .- Fiche d'essai n° 10 - IRAT Réunion
- [2] BAKALOWICZ (1974) .- L'évapotranspiration réelle - Recherche d'une méthode opérationnelle d'évaluation journalière .- CTGREF, Antony, France
- [3] BLANEY H.F. et CRIDDLE W.D. (1950) .- Determining water requirement in irrigated areas from climatological and irrigation data .- U.S. Dpt. Agric., 96 p.
- [4] BOUCHET R.J. (1964) .- Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole .- In "L'eau et la production végétale" - Ed. INRA Paris, p.152-232
- [5] BROCHET P. BERBIER N. (1975) .- L'évapotranspiration, aspect agrométéorologique - Evaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle .- Monographie n° 65 de la Météorologie Nationale, 95 p.
- [6] CHOW V.T. et al. (1964) .- Evapotranspiration .- Handbook of applied hydrology - Section II, 38 p.
- [7] CIEH (1971) .- Etude comparative des différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle .- Bull. Liaison Com. Interafr. Etud. Hydraul., N° 4, pp.8-13
- [8] DIRECTION DE LA METEOROLOGIE .- Bulletins climatologiques mensuels et annuels .- Service Météorologique de La Réunion
- [9] DOORENBOS J., PRUITT W.O. (1975) .- Crop Water Requirements - Irrigation and Drainage .- Paper n° 24 - F.A.O. Rome, 180 p. - Edition française : Les besoins en eau des cultures.
- [10] FORTIN (1973) .- La détermination de l'évapotranspiration réelle en vue de son application à des modèles paramétriques de synthèse des débits en hydrologie .- Thèse, Académie Montpellier, 114 p.

- [11] JACKSON R.D. & al. (1977) .- Wheat canopy temperature : a practical tool for evaluating water requirements .- Water Res. Res., vol. 13, n° 3, p. 651-656
- [12] LYONET G. (1973) .- Détermination de l'évapotranspiration potentielle du bassin en eau d'irrigation d'une graminée fourragère dans les conditions climatiques du bras de La Plaine (La Réunion) .- In Revue agricole et sucrière de L'île Maurice, .pp. 221-231
- [13] PENMAN H.L. (1948) .- Natural evaporation from open water, bore soil and grass .- Proc. Roy. Soc. London A 193, PP.120-145
- [14] RASMUSSEN E.M. (1977) .- Hydrological application of atmospheric vapour - flux analysis .- WMO Operational Hydrology - Rept n° 11, 50 pp.
- [15] REMENIERAS G. (1980) .- L'hydrologie de l'ingénieur .- Eyrolles, 2e ed. revue et augmentée, 456 p.
- [16] RIOU C. (1970) .- Quelques exemples d'application des mesures de rayonnement à la détermination de l'évapotranspiration en climat tropical .- Cah. ORSTOM, n° 4, p. 19-37
- [17] RADMANABHAMURTY B. et al. (1970) .- On the water balances of some indian stations .- J. Hydrol., Ned., vol. 11, n° 2, pp. 169-184
- [18] SARRAF S. (1973) .- Estimation de l'évapotranspiration potentielle et consommation en eau des cultures en région semi-aride (Liban) .- Thèse UER Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier (France), 114 p.
- [19] SEGUIN B. (1975) .- Etude comparative des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du Sud de la France (région d'Avignon) .- Ann. Agron., vol. 26, n° 6, p. 671-691
- [20] SEGUIN et al. (1980) .- Recherche sur l'estimation de l'ETR dans le bilan d'eau à l'échelle régionale .- Compte-rendu de fin d'étude DGRST

- [21] SOCIETE METEOROLOGIQUE DE FRANCE (1977) .- Evapotranspiration et bilan hydrique .- La Météorologie, n° spécial, VIe série, n° 11
- [22] THORNTWAITE C.W. (1948) .- Geog. Rev. 38, 85-94
- [23] TURC L. (1961) .- Evaluation des besoins en eau d'irrigation - Evapotranspiration potentielle .- Ann. Agronomique, 1961 - 12

ANNEXES

ANNEXE III.1

TEMPERATURE

1. ESTIMATION DES VALEURS MANQUANTES DE TEMPERATURES MENSUELLES PAR
REGRESSION MULTIPLE

Stations	Indice Météo.	Equations de régressions	Coefficient de corrélation x 100	Observations
La Montagne	233	$0.489(235) + 0.426(253) + 2.4$	97.8	
Gillot	235	pas de lacunes		
Le Brulé Val Fleuri	253	$0.367(233) + 0.11(235) + 0.589(291) + 4.5$	98.5	
Le Brulé ONF	254	$0.446(233) + 0.105(235) + 0.41(291) - 0.8$	97.4	
Le Port	260	$0.386(233) + 0.239(235) + 0.314(253) + 5.8$	97.6	
Menciol	287	$0.251(235) + 0.31(397) + 0.323(482) + 3.8$	98.1	
Dos D'Ane	292	$0.198(235) + 0.396(253) + 0.377(446) + 1.1$	97.1	
Aurère	313	$0.333(235) + 0.325(482) + 0.275(514) - 3.8$	98	+ corrélation simple
Le Guillaume	331	éliminée, trop de lacunes		
Petite France	332	$0.521(253) + 0.459(402) + 0.5$	97.4	
Piton Maïdo	333	éliminée, trop de lacunes		
St-Benoît	339	éliminée, trop de lacunes		
Hellbourg	345	$0.288(235) + 0.376(397) + 0.286(634) - 1.5$	97.8	+ corrélation simple
St-Gilles	350	éliminée, trop de lacunes		
Trois Bassins	381	$0.166(391) + 0.455(253) + 0.272(482) + 2$	97.2	+ corrélation simple
Colimaçons	391	pas de lacunes		
Cilaos	394	$0.645(446) + 0.399(453) + 0.6$	96.6	
Plaine des Palmistes	397	$0.418(235) + 0.516(287) + 0.194(446) - 7.9$	98	
Piton Ste-Rose	399	éliminée, trop de lacunes		
Carreau Alfred	402	$0.493(332) + 0.234(391) + 0.345(446) - 3.1$	97.8	
Petite Plaine	407	éliminée, trop de lacunes		
St-Leu	420	éliminée, trop de lacunes		
Plaine des Cafres	446	$0.259(235) + 0.179(397) + 0.405(514) + 0.244(482) - 10.7$	96.1	+ corrélation simple
Plaine des Macques	453	$0.279(446) + 0.169(514) + 0.256(544) + 0.293(634) - 2.7$	96.9	
Gite de Bellecombe	458	$0.109(446) + 0.289(484) + 0.467(634) - 6.6$	93.5	
Etang Salé les Bains	482	$0.427(514) + 0.439(544) + 0.228(484) - 2$	98.6	
Rivière St-Louis	484	$0.462(514) + 0.294(544) + 0.232(482) - 0.3$	98.3	
Tampon PK 13	485	$0.503(391) + 0.526(453) - 0.1$	96.8	
Etang Salé les Hauts	492	$0.401(482) + 0.331(514) + 0.301(634) - 0.1$	98.3	
Tampon Ville	505	$0.631(514) + 0.34(446) + 2.1$	97.4	
Ligne Paradis	514	pas de lacunes		
Bassin Flat	526	$0.498(514) + 0.461(634) + 1.4$	98.3	+ corrélation simple
St-Pierre	544	pas de lacunes		
St-Philippe	559	$0.511(514) + 0.414(544) + 2.2$	96.1	
St-Joseph NE'A	577	$0.391(526) + 0.138(559) + 0.417(634) + 3.4$	97.9	
Piton Cour St-Leu	633	$0.282(514) + 0.342(482) + 0.294(634) + 1.2$	97.3	+ corrélation simple
Bérive (102)	634	$0.457(235) + 0.308(514) + 0.269(482) - 4.6$	97.9	

Précision des observations

* Pour le cas d'un coefficient de corrélation élevé : station 253 corrélée avec stations 233, 235, 391 (R = 0.985).

Sur 123 observations estimées comparées aux valeurs mesurées :

- . 38 fois l'écart est inférieur à 0.1°C,
- . 82 fois l'écart est compris entre 0.1 et 1°C,
- . 3 fois l'écart est supérieur à 1°C.

Pour un coefficient de corrélation plus faible : station corrélée à 446, 484, 634 ($R = 0.935$).

Sur 102 observations estimées comparées aux valeurs mesurées :

- . 5 fois l'écart est inférieur à 0.1°C ,
- . 52 fois l'écart est inférieur à 0.5°C ,
- . 27 fois l'écart est compris entre 0.5 et 1°C
- . 18 fois l'écart est supérieur à 1.0°C .

L'estimation des valeurs manquantes, présente, même dans les cas les plus défavorables, des risques d'erreur assez limités.

2. REGRESSION LINEAIRE ENTRE LA TEMPERATURE MOYENNE INTERANNUELLE ET L'ALTITUDE - 27 stations réparties de 5 à 2250 m.

2.1. Echantillon complet de 27 stations

Mois	Coefficient de corrélation $R \times 100$	Coefficient de régression	
		A (/100 m)	B
Janvier	0.998	- 0.673	26.6
Février	0.987	- 0.658	26.6
Mars	0.989	- 0.651	26.2
Avril	0.988	- 0.644	25.1
Mai	0.984	- 0.651	23.4
Juin	0.983	- 0.675	21.8
Juillet	0.983	- 0.668	21
Août	0.982	- 0.679	20.8
Septembre	0.977	- 0.676	21.4
Octobre	0.975	- 0.665	22.5
Novembre	0.981	- 0.657	24.1
Décembre	0.988	- 0.668	25.7
Année	0.985	- 0.664	23.8
Décembre- Avril "ETE"	0.989	- 0.659	26.1
Mars-Novem- bre "HIVER"	0.982	- 0.667	22.1

La variation du coefficient B justifie l'étude mensuelle.

2.2. Influence de l'altitude

Echantillon	Année	Déc. à Avril ETE	Mai à Novembre HIVER	Valeurs extrêmes du coefficient de corrélation (et mois correspondant)		
				Maxi	Mini	
27 stations alt. : 5 à 2250 m	R	98.5	98.9	98.2	98.9 (2)	97.5 (10)
	A	.664	.659	.667	.651	.665
26 stations - Bellecombe (alt : 2250 m) alt : 5 à 1550 m	R	98.8	98.9	98.6	99.1 (3)	98.4 (7,8,9)
	A	.713	.698	.724	69.1	.714
16 stations alt. : 25 à 980 m	R	98.4	98.7	98	98.8 (2,3)	97.5 (6)
	A	.696	.689	.700	.678	.683
9 stations alt. : 900 à 2250 m	A	96.1	97.4	94.8	97.5 (4)	91.3 (10)
	R	.515	.530	.504	.508	.457

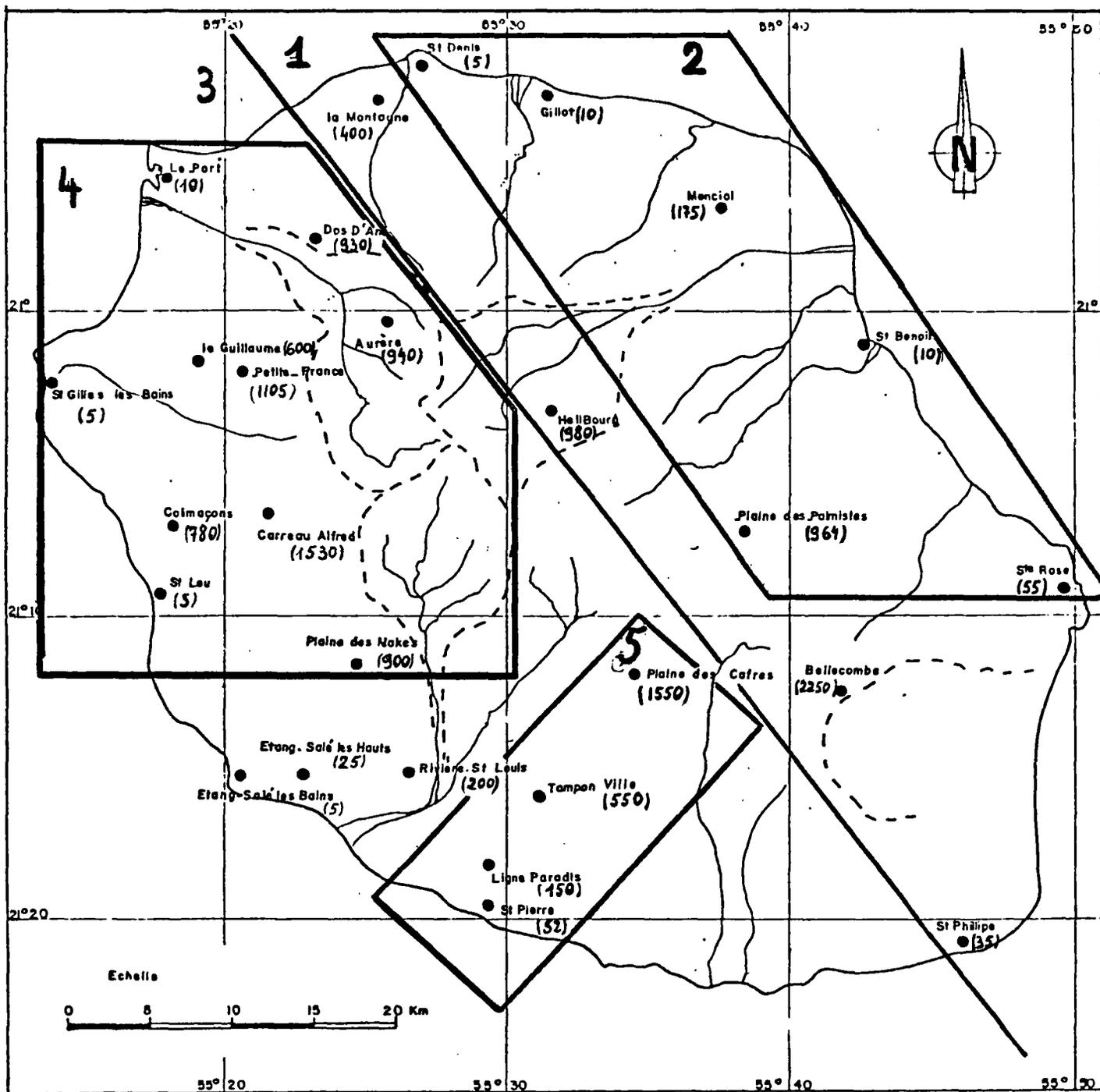
Les coefficients de corrélation et les gradients diminuent pour les altitudes élevées. La station de Bellecombe affecte fortement le gradient à elle-seule.

Les coefficients de corrélation paraissent supérieurs pendant l'été, inversement les gradients sont alors plus faibles.

2.3. Etude régionale

Nous avons retenus cinq zones géographiques représentées ci-après.

RELATION ENTRE LES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES ET L'ALTITUDE



(780) altitude des postes thermométriques

Zones	Année	ETE	HIVER	Valeurs extrêmes de coefficient de corrélation (et mois correspondant)	
1 (9 stations)	98.9	99.2	98.7	99.3 (1,12)	98. (10)
	.609	.610	.608	.624	.584
2 (6 stations)	99.3	99.3	99.3	99.5 (12)	99. (2)
	.791	.754	.818	.75 à .85	.756
3 (17 stations)	98.7	99.	98.4	99.1 (3)	98.1 (9)
	.712	.704	.717	.704	.738
4 (10 stations)	98.5	98.9	98.1	99. (1,3,12)	97.6 (7)
	.739	.735	.742	.72 à .75	.707
5 (7 stations)	99.8	99.8	99.8	99.9 (5,6, 11,12)	99.6 (2,10)
	.673	.655	.685	.66	.68

Il n'apparaît pas de différences nettes entre côtes au vent et sous le vent, le gradient étant le plus souvent proche de $0.7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

On s'aperçoit à nouveau que la prise en compte de la station de Bellecombe modifie fortement les valeurs du gradient (il passe de 0.6 à 0.8 de la zone 1 à la zone 2).

On obtient une très bonne relation sur le secteur de St-Pierre - Plaine des Cafres, le gradient y est proche de celui observé sur l'ensemble des valeurs.

Régressions linéaires établies entre les températures mensuelles et l'altitude pour 30 postes de La REUNION

TABLEAU DES COEFFICIENTS DE CORRELATION

-0.983	-0.987	-0.979	-0.985	-0.977	-0.974	-0.971	-0.969	-0.960	-0.977	-0.980	-0.980	71
-0.984	-0.985	-0.988	-0.985	-0.983	-0.976	-0.981	-0.983	-0.972	-0.974	-0.982	-0.980	72
-0.987	-0.983	-0.983	-0.982	-0.973	-0.981	-0.977	-0.978	-0.974	-0.968	-0.965	-0.970	73
-0.983	-0.981	-0.984	-0.984	-0.972	-0.978	-0.972	-0.976	-0.967	-0.971	-0.981	-0.982	74
-0.984	-0.989	-0.987	-0.981	-0.976	-0.973	-0.973	-0.972	-0.973	-0.959	-0.984	-0.981	75
-0.985	-0.991	-0.985	-0.987	-0.984	-0.980	-0.981	-0.983	-0.977	-0.984	-0.976	-0.980	76
-0.988	-0.987	-0.987	-0.982	-0.984	-0.981	-0.980	-0.984	-0.977	-0.963	-0.975	-0.985	77
-0.986	-0.984	-0.986	-0.988	-0.976	-0.975	-0.982	-0.980	-0.977	-0.971	-0.983	-0.985	78
-0.979	-0.982	-0.981	-0.986	-0.981	-0.979	-0.972	-0.969	-0.973	-0.956	-0.978	-0.987	79
-0.991	-0.983	-0.988	-0.986	-0.984	-0.975	-0.975	-0.967	-0.975	-0.975	-0.966	-0.975	80
-0.979	-0.980	-0.982	-0.982	-0.979	-0.976	-0.978	-0.981	-0.977	-0.974	-0.979	-0.970	81
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	

TABLEAU DES GRADIENTS THERMOMETRIQUE S/100M

-0.673	-0.626	-0.636	-0.632	-0.638	-0.674	-0.642	-0.668	-0.657	-0.649	-0.609	-0.667
-0.668	-0.621	-0.626	-0.621	-0.624	-0.634	-0.646	-0.630	-0.648	-0.635	-0.614	-0.674
-0.615	-0.619	-0.617	-0.641	-0.641	-0.682	-0.677	-0.671	-0.645	-0.680	-0.700	-0.723
-0.705	-0.659	-0.665	-0.664	-0.643	-0.680	-0.650	-0.640	-0.664	-0.681	-0.678	-0.690
-0.701	-0.652	-0.655	-0.643	-0.650	-0.666	-0.644	-0.681	-0.669	-0.637	-0.676	-0.677
-0.675	-0.668	-0.674	-0.649	-0.623	-0.660	-0.684	-0.664	-0.687	-0.684	-0.671	-0.645
-0.662	-0.632	-0.651	-0.613	-0.642	-0.664	-0.661	-0.666	-0.688	-0.632	-0.661	-0.654
-0.676	-0.679	-0.681	-0.612	-0.675	-0.681	-0.669	-0.658	-0.643	-0.703	-0.691	-0.682
-0.668	-0.626	-0.639	-0.666	-0.638	-0.661	-0.665	-0.651	-0.645	-0.638	-0.650	-0.613
-0.617	-0.634	-0.606	-0.620	-0.661	-0.648	-0.656	-0.667	-0.650	-0.636	-0.638	-0.674
-0.666	-0.650	-0.610	-0.606	-0.655	-0.637	-0.676	-0.650	-0.655	-0.611	-0.661	-0.629

TABLEAU DES COEFFICIENTS B

26.0	26.1	25.3	25.0	23.1	21.2	20.6	20.1	20.6	21.9	23.4	25.5
26.3	25.9	25.9	24.9	23.8	22.0	21.7	21.5	21.5	22.8	24.0	25.7
26.6	26.5	26.5	24.7	23.4	21.8	20.9	20.6	21.0	22.5	24.1	25.4
26.1	25.9	25.5	25.0	22.8	21.4	20.3	20.5	20.2	22.3	23.7	25.8
27.0	26.5	25.6	25.4	23.3	21.3	20.8	20.2	20.5	21.4	24.5	25.2
26.2	26.4	26.2	24.9	23.6	22.3	21.2	21.4	21.3	23.1	24.3	25.7
27.1	26.4	26.7	25.0	23.8	21.9	21.3	21.4	21.8	22.8	24.4	26.3
26.8	27.0	26.0	25.1	23.8	22.0	20.8	21.0	21.8	23.2	24.5	26.1
26.8	26.4	25.8	24.6	23.1	21.7	21.0	21.2	21.8	22.4	24.4	25.9
26.4	25.7	26.8	25.3	23.5	21.5	20.8	20.4	21.5	23.1	24.4	26.3
26.7	26.9	26.4	25.8	23.0	21.8	20.3	21.0	21.6	23.0	24.0	25.7

Altitude moyenne des mailles de La Réunion.

Nous travaillons sur la couverture topographique de La Réunion au 1/50 000 de l'IGN.

- . Pour une maille à pente régulière, nous considérons la valeur au centre de la maille.
- . Pour une maille en zone de changement de pente (en bordure des cirques), nous découpons la maille en secteurs de pente régulière, considérons l'altitude moyenne de ces différents secteurs, puis effectuons la moyenne pondérée (par leur surface respective).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	80	80	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	200	250	200	40	0	0	0	0	0	0	2
3	0	0	0	0	0	0	60	80	100	200	350	600	500	350	100	10	30	10	0	0	0	3
4	0	0	0	0	0	100	200	400	500	750	950	950	850	700	350	90	60	20	0	0	0	4
5	0	0	0	0	20	180	550	950	1200	1300	1400	1380	1250	1100	700	350	200	100	0	0	0	5
6	0	0	0	0	10	200	750	1300	1700	1950	1900	1880	1780	1500	950	700	550	450	200	0	0	6
7	0	0	0	5	30	300	800	1300	2000	2350	2500	1800	1250	1000	750	1100	1100	700	350	150	0	7
8	0	0	15	30	100	350	850	1250	1400	1400	2200	1450	1350	1000	1000	1200	1000	600	500	280	0	8
9	0	0	40	100	160	400	550	800	700	1000	1400	2200	1500	1500	1600	1700	1150	600	180	30	0	9
10	0	0	100	200	320	400	700	1300	1200	1200	2000	2300	1200	900	1300	1000	700	350	80	0	0	10
11	0	100	250	350	550	750	850	1100	1600	1900	2100	1800	900	900	1200	1300	700	240	50	0	0	11
12	0	200	500	650	750	950	1200	1200	1450	1600	1500	1600	1400	800	1000	1000	650	240	40	0	0	12
13	0	300	650	950	1150	1250	1500	1550	1600	1550	1300	1500	1700	1300	800	750	500	240	80	0	0	13
14	50	300	700	1100	1250	1450	1700	1750	1500	1250	1300	1100	1100	900	700	500	300	180	60	0	0	14
15	80	300	500	800	1200	1400	1500	1900	1400	1050	1100	600	800	600	450	220	140	50	0	0	0	15
16	100	350	700	1300	1200	2200	2300	2200	1850	1300	800	650	450	200	200	90	70	20	0	0	0	16
17	50	400	900	1500	2100	2250	2200	1850	1700	1150	600	350	180	100	40	30	25	0	0	0	0	17
18	0	250	900	1700	1950	2300	2100	1750	1400	800	450	180	70	20	0	0	0	0	0	0	0	18
19	0	180	900	1500	1600	1600	1300	1550	1200	600	200	60	40	0	0	0	0	0	0	0	0	19
20	0	150	550	750	620	550	700	1050	800	350	80	0	0	0					0	0	0	20
21	0	0	150	200	120	150	200	400	400	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
22	0	0	0	0	0	0	0	100	100	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22

ANNEXE III.2

INSOLATION

1. ESTIMATIONS POUR LES VALEURS MANQUANTES

Stations	Indice	Nombre de lacunes
Gillot	235	0
Le Port	260	39
Cambaie	281	87
Menciol	287	1
Petite France	332	1
Colimaçons	391	1
Cilaos	394	16
Plaine des Palmistes	397	6
Carreau Alfred	402	14
Plaine des Cafres	446	15
Plaine des Makes	453	8
Gîte de Bellecombe	458	8
Tampon PK 13	485	25
Etang Salé les Hauts	492	22
Ligne Paradis	514	1
St-Pierre	544	.0
Piton St-Leu	633	46

En fonction du nombre restreint de postes, nous estimons les valeurs manquantes, même aux postes présentant un nombre important de lacunes ; seul le poste de CAMBAIE (281) est éliminé de suite.

L'édition de la matrice de corrélation entre les stations témoigne de liaisons en général faibles et du caractère régional de l'insolation : les coefficients de corrélation augmentent avec la proximité des postes.

COEFFICIENTS DE CORRELATION LINEAIRE (R) ENTRE LES STATIONS MESURANT
L'INSOLATION ETABLIS A PARTIR DES VALEURS MESUREES - Matrice des R x 100.

Indice	235	260	281	287	332	391	394	397	402	446	453	458	485	492	514	544	633
235	100																
260	75.6	100															
281	52.7	<u>93.6</u>	100														
287	<u>87.1</u>	61.2	39.6	100													
332	36.6	53.6	70.8	30.9	100												
391	35.6	58.7	62.3	33.0	<u>82.3</u>	100											
394	69.3	64.2	43.5	63.5	25.2	34.1	100										
397	66.8	70.7	32.9	77.2	44.8	46.9	62.6	100									
402	25.6	52.9	57.4	23.1	<u>83.4</u>	76.3	24.4	51.5	100								
446	69.8	62.7	26.7	60.7	35.3	38.8	<u>86.1</u>	54.3	33.6	100							
453	58.8	68.2	59.2	56.6	63.1	66.6	61.1	50.2	52.6	67.9	100						
458	48.3	50.9	21.9	46.5	24.3	22.6	77.9	62.5	32.3	72.6	34.5	100					
485	59.4	56.3	45.0	61.2	49.1	64.2	72.2	52.8	41.7	72.2	<u>81.1</u>	52.9	100				
492	78.1	68.5	52.1	74.0	27.3	39.1	75.2	56.9	21.1	66.3	75.2	43.4	72.6	100			
514	69.8	64.9	47.0	66.2	23.3	36.8	<u>84.3</u>	53.6	19.3	74.6	72.6	56.1	75.1	<u>86.6</u>	100		
544	74.7	64.0	35.8	66.0	7.4	17.0	<u>85.9</u>	49.7	3.1	73.7	58.0	57.5	60.2	<u>85.9</u>	<u>91.3</u>	100	
633	62.7	68.2	<u>93.6</u>	59.4	53.5	71.1	73.5	65.6	53.6	75.5	<u>83.1</u>	54.6	<u>81.5</u>	77.8	<u>80.2</u>	67.7	100

Guidé par ce tableau, nous avons établi des équations de régressions multiples entre les stations, afin d'estimer les valeurs manquantes.

REGRESSIONS MULTIPLES ETABLIES ENTRE LES STATIONS MESURANT L'INSOLATION

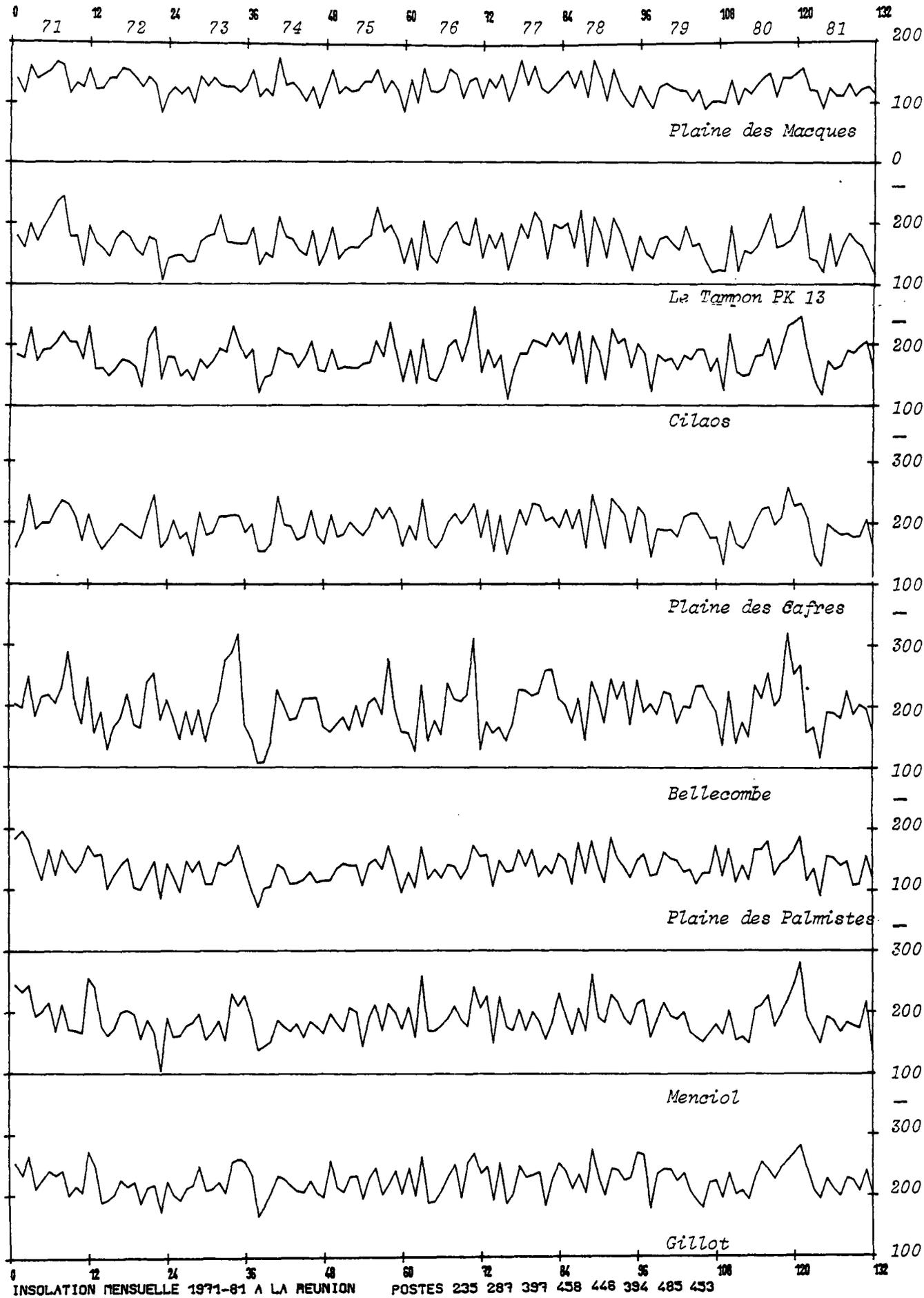
. Equations de régression obtenues et coefficients de corrélation

	Indice de station	Equation de régression	Coefficient de corrélation	Remarques
1	235	complète	R = 0.833	
2	260	0.657(235) + 0.352(391) + 30.3	R = 0.833	
3	281	éliminée, trop de lacunes		
4	287	0.764(235) + 0.405(397) - 37.4	R = 0.908	
5	332	0.393(391) + 0.429(402) + 3.6	R = 0.884	
6	391	0.726(332) + 0.263(402) + 24.5	R = 0.84	
7	394	0.292(446) + 0.194(544) + 0.274(514) + 0.207(458) - 26.1	R = 0.946	corrélations simples
8	397	0.475(287) + 0.306(260) - 21.8	R = 0.838	
9	402	0.706(332) + 0.234(391) + 15.8	R = 0.845	
10	446	0.691(394) + 0.182(485) + 39.1	R = 0.877	corrélation simple
11	453	0.277(485) + 0.110(492) + 0.268(633) + 2.3	R = 0.9	corrélation simple
12	458	0.948(394) + 0.228(446) - 18	R = 0.81	corrélation simple
13	485	0.814(453) + 0.353(394) - 0.9	R = 0.875	corrélation simple
14	492	0.441(514) + 0.199(544) + 0.377(235) - 27.1	R = 0.904	
15	514	0.600(544) + 0.186(492) + 0.311(485) - 12.2	R = 0.948	
16	544	complète		
17	633	0.673(453) + 0.344(514) + 38.3	R = 0.881	

Nous avons dû nous contenter de résultats assez modestes et faire parfois appel aux régressions linéaires.

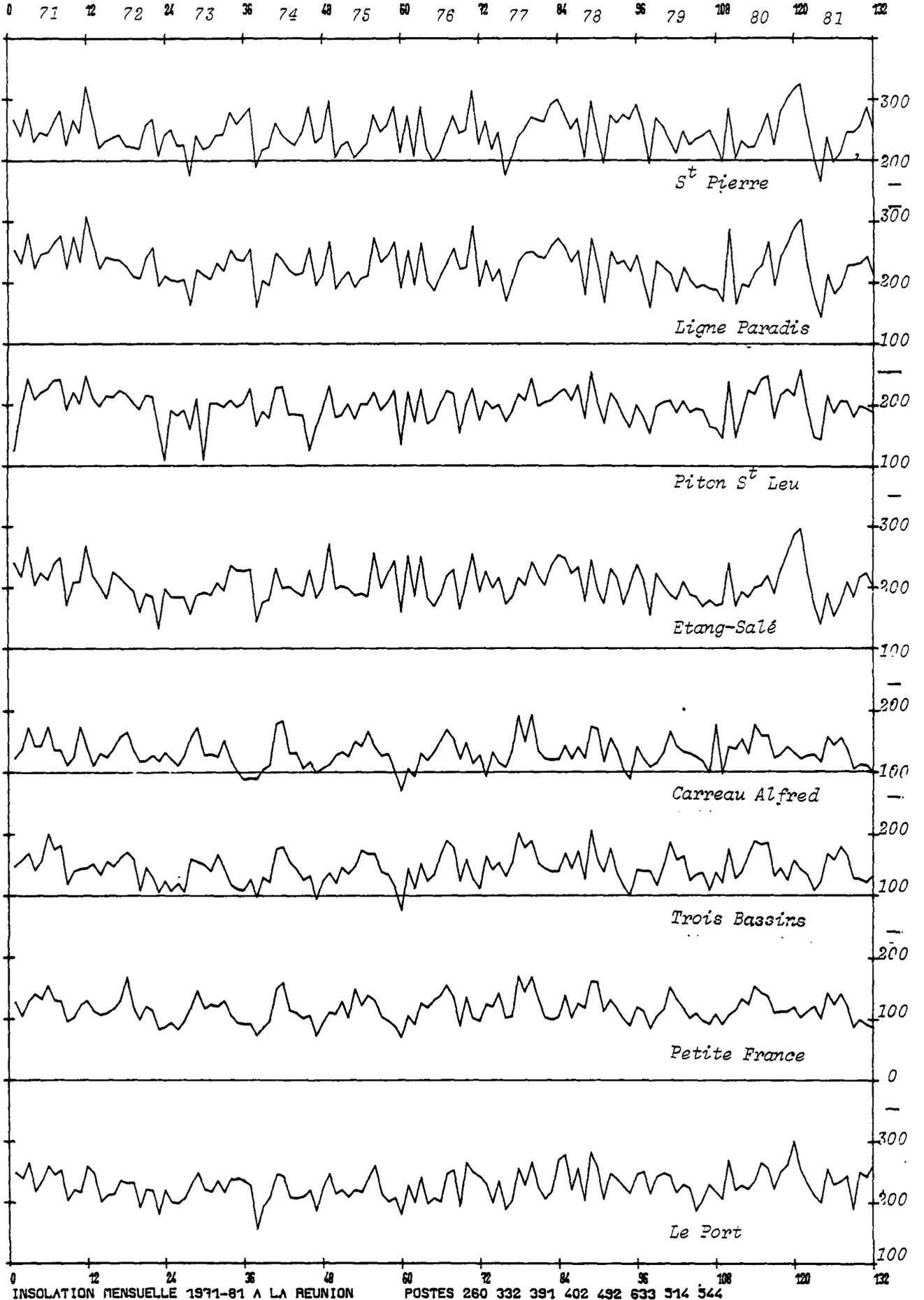
Stations de la côte au vent et de la zone centrale de l'île

insolation en h



insolation
en h

Stations de la côte sous le vent



PRECISION DES ESTIMATIONS.

Dans le cas de coefficient de corrélation élevé ($R = 0.948$ pour la station de Ligne Paradis), la comparaison des valeurs estimées aux valeurs observées aboutit aux résultats suivants :

- plus des 2/3 des mois reconstitués présentent un écart inférieur à 10 h (écart relatif d'environ 5 %),
- moins du sixième des mois reconstitués présentent un écart supérieur à 20 h (écart relatif d'environ 10 %).

Cet écart relatif est toujours inférieur à 15 %.

Pour un faible coefficient de corrélation ($R = 0.841$, pour la station de Bellecombe), on observe que :

- 1/4 des valeurs estimées présentent un écart inférieur à 10 h (écart relatif d'environ 5 %),
- 40 % des valeurs estimées présentent un écart supérieur à 20 h (écart relatif d'environ 10 %).

Pour cinq valeurs sur 98, l'écart relatif dépasse 20 %.

2. REGRESSION LINEAIRE ENTRE L'INSOLATION ET L'ALTITUDE

Le minimum d'insolation se situant dans la zone d'altitude moyenne, les coefficients de corrélation entre l'insolation mensuelle et l'altitude sont généralement faibles.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1971	-.601	-.581	-.459	-.600	-.502	-.558	-.504	-.495	.050	-.440	-.550	-.549
1972	-.774	-.539	-.709	-.555	-.669	-.451	-.637	-.508	-.290	-.131	-.252	-.361
1973	-.391	-.614	-.444	-.544	-.493	-.571	-.494	-.446	-.008	-.280	-.070	-.678
1974	-.670	-.626	-.752	-.656	-.371	-.453	-.522	-.565	-.371	-.372	-.321	-.627
1975	-.703	-.562	-.564	-.630	-.421	-.526	-.445	-.579	-.455	-.124	-.554	-.513
1976	-.721	-.576	-.511	-.563	-.521	-.678	-.378	-.551	-.287	-.406	-.280	-.702
1977	-.556	-.634	-.698	-.682	-.554	-.421	-.384	-.492	-.369	-.149	-.305	-.625
1978	-.577	-.580	-.517	-.679	-.566	-.406	-.532	-.368	-.439	-.264	-.581	-.408
1979	-.532	-.311	-.581	-.506	-.404	-.594	-.503	-.324	-.083	-.122	-.392	-.293
1980	-.716	-.532	-.534	-.595	-.604	-.282	-.505	-.394	-.409	-.515	-.171	-.517
1981	-.490	-.623	-.564	-.657	-.542	-.335	-.455	-.442	-.474	-.493	-.534	-.584
\bar{x} 1971-1981	-.622	-.571	-.576	-.624	-.513	-.480	-.487	-.469	-.285	-.300	-.364	-.532

Ils sont généralement plus faibles l'hiver (parfois non significativement différent de zéro à 95 %) que l'été (de l'ordre de 0.6). Il semble que ceci soit lié à l'existence quasi-permanente et stable du plafond nuageux aux altitudes intermédiaires (800-1500 m) pendant les mois d'hiver, se manifestant par une inversion du gradient d'insolation au niveau de cette tranche d'altitude.

Cette inversion de gradient apparaît beaucoup plus nettement en septembre 1971 ($R = 0.05$) qu'en janvier 1972 ($R = 0.77$)

3. ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE

Ces quatre composantes expliquent près de 87 % de la variance totale ; le pourcentage expliqué par chacune de ces composantes est respectivement de 59.4, 15.2, 6.4 et 5.9.

Toutes les stations sont relativement corrélées avec les quatre composantes : $R > 0.86$ pour le Port et Piton St-Leu et $R > 0.8$ pour toutes les autres stations.

AXE PROPRE	1	2	3	4
VALEUR PROPRE	9.499E 00	2.438E 00	1.017E 00	0.422E-01
POURCENTAGE EXPLIQUE	59.4	15.2	6.4	5.9
POURCENTAGE CUMULE	59.4	74.6	81.0	86.9

 * PROJECTIONS DES VARIABLES *

SOUS FORME DE
 COEFFICIENT DE CORRELATION ENTRE LES VARIABLES
 ET LES COMPOSANTES PRINCIPALES

LES 4 COMPOSANTES

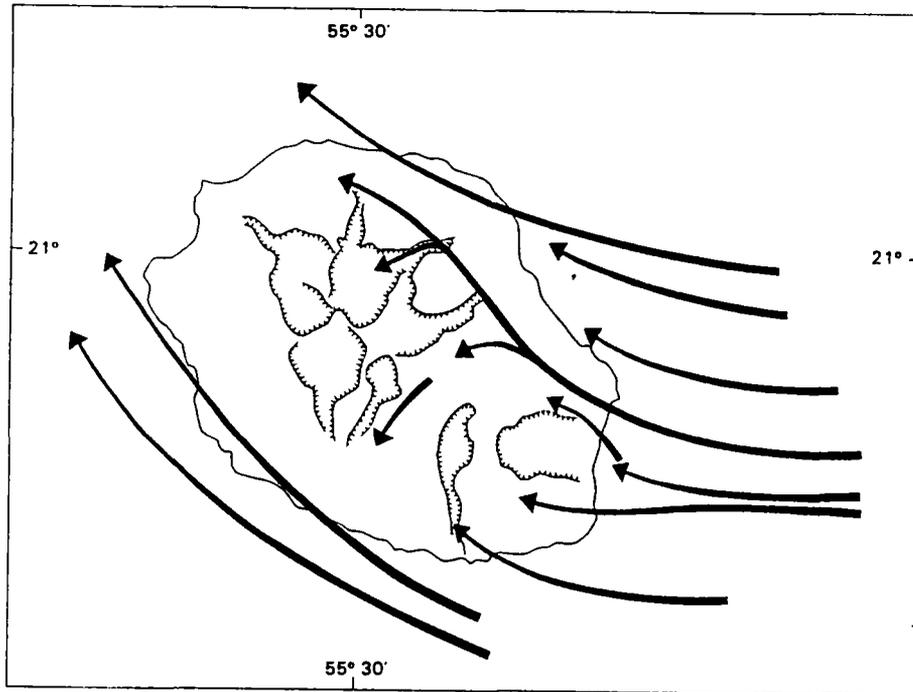
AXE PROPRE	1	2	3	4	PRINCIPALES
NCM DE LA VARIABLE					
235	0.832	-0.183	0.287	-0.276	0.940
287	0.786	-0.187	0.385	-0.290	0.941
397	0.738	0.069	0.554	0.032	0.926
458	0.666	-0.217	0.739	0.618	0.964
446	0.844	-0.150	-0.065	0.324	0.918
485	0.860	0.064	-0.270	0.043	0.905
514	0.872	-0.315	-0.223	-0.030	0.954
544	0.811	-0.501	-0.103	-0.049	0.960
260	0.781	0.185	0.108	-0.308	0.866
332	0.550	0.768	0.051	0.012	0.946
391	0.622	0.694	-0.092	-0.018	0.936
402	0.491	0.769	0.133	0.177	0.939
394	0.871	-0.298	-0.030	0.284	0.964
453	0.836	0.226	-0.317	-0.134	0.932
402	0.858	-0.297	-0.112	-0.252	0.949
633	0.774	0.124	-0.361	0.022	0.863

1re composante. Les coefficients de corrélation assez élevés des stations avec cette première composante sont assez homogènes ($0.73 < R < 0.87$, pour 12 stations). Les plus "mauvais" coefficients de corrélation correspondent aux secteurs des Hauts de St-Gilles ($R = 0.491$ à Carreau Alfred) et du Gîte de Bellecombe ($R = 0.666$). Il s'agit des secteurs ayant un contraste saisonnier assez marqué (§ II.4.3.1., et annexe II.4.3). Toutes les autres stations ont une distribution mensuelle très irrégulière : forts écarts entre mois consécutifs, mais relativement synchrones entre ces différentes stations (annexe II.4.3) ; pics positifs en décembre 1971, février 1975, novembre 1976, janvier 1981, ... pics négatifs en avril 1973, avril 1977, avril 1981.

2me composante. Le coefficient de corrélation est positif pour 8 stations, c'est-à-dire la moitié, mais la répartition géographique n'est pas très homogène. Si un fort pôle de corrélation positive ($R \approx 0.7$) apparaît sur les hauts de St-Gilles (maximum régulier d'insolation en mai-juin-juillet) les valeurs négatives de ces coefficients se répartissent sur le littoral (excepté la zone du Port) et sur les stations d'altitude, les valeurs positives étant imparties aux stations d'altitude intermédiaires (les moins ensoleillées). La station du Port empêche cependant d'établir une relation entre cette composante et la durée d'insolation. Un minimum annuel assez régulier apparaît en avril, pour les stations présentant un coefficient de corrélation négatif.

3me composante. La répartition géographique des coefficients de corrélation envers cette composante est la plus homogène. Le secteur de la Plaine des Cafres - Cilaos et toute la zone aval associée ($R = 0.361$ à Piton St-Leu), ainsi que le secteur de Trois Bassins, s'opposent au reste de l'île où la Plaine des Palmistes est le pôle dominant ($R = 0.554$). Mais, il ne nous apparaît pas de divergences de comportement très nettes entre ces 2 pôles opposés ; 3 postes présentent un coefficient de corrélation inférieur à 0.2 en valeur absolue.

4me composante. L'opposition apparaît entre le littoral (excepté Piton St-Leu) et la zone centrale de l'île : pôle de corrélation positif au Gîte de Bellecombe ($R = 0.678$). Les trois postes d'altitude présentent un maximum saisonnier en septembre-octobre-novembre. A l'opposé, les postes de corrélation négative (sur le littoral Nord surtout) ont plutôt tendance à être déficitaires en septembre-octobre. Cette opposition n'est pas toujours évidente, et de nombreux postes ont une corrélation très faible : pour 7 postes, $|R| < 0.05$

ANNEXE III.31. LE VENT

Le choc et la déviation de l'alizé sur la Réunion (Defos du Rau, thèse p. 70).

ROSES DES VENTS MENSUELLES (en ‰) — CLASSIFICATION PAR TYPES DE VENTS

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	T 12
ALIZE														
NE à NNE	St-D.	179,6	205,4	113,8	169,5	126,9	114,6	84,8	110,4	175,7	203,6	257	283,9	168,7
	St-P.	265,7	310,1	329,2	392,9	402,9	47,3	317,6	318,2	355,4	330,2	288,8	291,9	338,8
Ensemble SE	St-D.	703,4	655,8	650,7	620,4	702,4	706,1	843,9	807,3	722	688,2	601,7	536,9	686,6
	St-P.	452,5	420,5	442,2	413,4	452,7	422,8	577,3	592,1	500,2	453,3	442,5	429,3	466,5
SECTEUR O.														
S à S SW	St-D.	66,4	83,6	94,7	141,6	130,2	124,6	60,1	48,8	65,8	61,6	89	97,6	88,6
	St-P.	36,2	50	33,3	27,6	20,8	21,2	14,8	14,8	32,6	42,8	44,2	45,9	32,5
SW à WNW	St-D.	10,2	6,2	16,4	10,4	8,8	12,8	5,2	2,1	7	5,6	5,4	12,4	8,6
	St-P.	105,5	99,1	66,4	59,1	46,2	48,4	27,2	30,8	49,8	83,1	76,9	101,9	66,2
NW à N	St-D.	48,1	45,3	52,8	48,9	24,6	32,2	17,7	12,6	20,1	20,4	39,2	59,9	35,1
	St-P.	120,4	106	107,9	87,8	62,2	84,7	53	47	51,5	80,6	89,7	102,4	82,7
Secteur SSW à SW	St-D.	21,3	32,7	31,3	40	31,4	29,1	16,9	8,2	14,5	15,3	14,5	22,6	23,1
	St-P.	42,2	44,7	26,6	28,3	59,1	20	12	12,4	29,2	36,7	34,6	36,6	28,5
CALME														
	St-D.	9,6	7,5	13,3	9,1	5,2	7,9	5,3	4,5	5	7,7	4,9	10	7,5
	St-P.	24,1	14,1	16,2	15,8	5,2	14,5	8,4	7,2	7,2	12,1	32,2	24,1	15,2
TOTAL : Saint-Denis 995,1 ‰ - Saint-Pierre 1001,9 ‰														

2. EVAPORATION PICHE

Valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation en mm et 1/10
(source Météorologie Nationale).

STATION	alt	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D.	An
GILLOT 1953 - 1980	21	131.0	113.4	119.4	120.3	132.0	130.5	138.1	145.9	142.1	145.6	129.3	125.5	1573.1
ST-PIERRE 1954 - 1980	52	106.7	90.4	94.9	89.7	98.3	95.9	100.7	106.9	106.0	112.3	103.1	103.4	1208.3
PL. des CAFRES 1961 - 1980	1550	37.3	31.6	33.6	29.6	32.5	29.7	27.3	29.1	36.3	42.4	37.6	35.9	402.9
PL. PALMISTES 1961 - 1980	964	30.8	29.3	30.6	32.3	38.5	39.4	31.9	34.2	34.2	32.6	28.4	32.3	394.5
CARREAU ALFRED 1969 - 1980	1530	30.3	28.7	32.6	33.4	46.8	45.7	61.3	42.5	37.0	37.0	33.1	34.1	442.5
PL. des MAKES 1961 - 1980	900	29.6	23.7	26.3	24.0	26.5	28.2	27.6	28.7	30.5	30.2	28.2	26.6	330.1
LIGNE PARADIS 1968 - 1980	105	111.1	92.3	95.1	93.7	96.8	102.1	107.9	120.5	118.3	122.6	117.5	116.9	1294.8
SAINT-JOSEPH 1961 - 1980	10	90.1	74.7	80.1	67.8	71.9	74.8	84.3	87.0	83.3	90.7	83.7	85.8	974.2

Valeurs moyennes annuelles d'évaporation (évaporomètre Piche)
calculées par M. ROBERT (Centre Universitaire de La Réunion)

Stations	Altitude	Période	Evaporation en mm
Gillot	21	1961-1979	1610
Ligne Paradis	105	1968-1979	1298
St-Pierre	52	1961-1979	1134
Savanhah	10	1961-1967	1219
St-Joseph	10	1961-1979	975
Menciol	175	1961-1967	880
Le Tampon	737	1961-1973	717
Cilaos	1200	1962-1971	610
Colimaçon	780	1973-1979	577
Carreau Alfred	1540	1969-1979	438
Plaine des Cafres	1550	1961-1979	429
Plaine des Palmistes	964	1961-1979	392
Plaine des Makes	900	1961-1979	333
Ferme Izautier	1600	1967-1972	292
Balouve	1500	1961-1967	225

3. HUMIDITE RELATIVE

VALEURS MOYENNES MENSUELLES DE L'HUMIDITE RELATIVE

		J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	Année
GILLOT : 1953 - 1980														
alt. 21 m	min	62	63	64	62	58	55	55	53	53	55	59	62	58
	max	90	90	90	89	87	87	87	86	85	85	86	88	88
	moy	76	77	77	76	73	71	71	70	69	70	73	75	73
ST-PIERRE : 1951 - 1980														
alt. 52 m	min	60	62	62	61	59	57	57	54	54	54	58	60	58
	max	88	88	89	88	87	87	86	85	84	84	85	86	86
	moy	74	75	76	75	73	72	72	70	69	69	72	73	72
PL des CAFRES 1961-1980														
alt. 1550 m	min	70	70	70	68	66	64	66	64	61	60	63	65	66
	max	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	97	98	98
	moy	84	84	84	83	82	81	82	81	80	79	80	82	82
COLIHACONS : 1963 - 1980														
alt. 780 m	min	69	70	69	66	62	58	61	60	62	64	67	68	65
	max	96	96	96	96	95	95	95	94	95	96	96	96	96
	moy	83	83	83	81	79	77	78	77	79	80	82	82	81
CARREAU ALFRED 1970-1980														
alt. 1530 m	min	69	67	66	61	54	51	54	56	55	58	62	64	60
	max	98	98	99	95	99	98	99	97	98	99	99	98	98
	moy	84	83	83	78	77	75	77	77	77	79	81	81	79
LIGNE PARADIS 1969-1980														
alt. 105 m	min	59	63	63	63	61	58	57	55	54	54	57	58	59
	max	92	92	93	93	93	91	92	91	90	90	91	91	92
	moy	76	78	78	78	77	75	75	73	72	72	74	75	76
SAVANNAH : 1961 - 1967														
alt. 10 m	min	53	53	54	54	51	50	49	47	52	52	54	53	52
	max	93	93	92	93	89	94	94	92	94	93	94	94	93
	moy	73	72	73	74	70	72	71	69	73	73	74	74	72
MENCIOL : 1961 - 1967														
alt. 175 m	min	65	66	67	65	63	63	66	63	61	62	64	68	64
	max	95	96	97	95	96	95	96	95	94	94	91	96	95
	moy	80	81	82	80	80	79	81	79	78	78	78	82	80
TAMPON : 1961 - 1967														
alt. 737 m	min	60	60	59	61	56	56	54	51	53	56	58	61	57
	max	95	96	95	96	95	95	94	92	94	94	96	96	95
	moy	78	78	78	79	76	76	74	72	74	75	78	79	76
PL. des MAKES : 1961-1968														
alt. 900 m	min	70	68	68	67	64	63	64	65	62	69	72	72	67
	max	99	99	98	98	99	99	98	99	98	99	99	100	99
	moy	85	84	83	83	81	81	81	83	80	84	86	86	83
ST-JOSEPH : 1961 - 1968														
alt. 10 m	min	65	64	63	64	62	60	60	59	62	60	62	64	62
	max	90	92	90	93	92	91	91	92	91	89	90	90	91
	moy	78	78	77	78	77	76	76	75	77	75	76	77	77

Valeurs de l'humidité relative au Port en 1980

EN 1980

LE PORT

Humidité Relative en %					
Mois	Moyenne	Maximale Moyenne	Minimale Moyenne	Moyenne du jour le plus humide	Moyenne du jour le plus sec
JANV	77	89	65	97	66
FEV	71	83	59	89	63
MARS	76	89	62	87	60
AVRIL	73	85	60	82	57
MAI	66	80	52	87	37
JUIN	66	79	53	86	54
JUIL	68	80	55	76	60
AOUT	61	73	48	70	52
SEPT	68	81	55	76	57
OCT	69	83	55	80	60
NOV	71	85	56	80	60
DEC	71	85	56	83	62
ANNEE	70	83	56	83	50

ANNEXE III.4

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

1. FORMULE DE L. TURC POUR LE CALCUL DE L'E.T.P. AU PAS DE TEMPS MENSUEL
APPLIQUEE A LA REUNION

$$ETP_{Turc} = C \quad f(I) \quad g(T) \times h(H_r)$$

où C coefficient mensuel = 0.4 pour les mois de 30 et 31 jours,
= 0.37 pour les mois de février

$$g(T) = \frac{T}{T+15} \quad T \text{ température moyenne mensuelle}$$

$$f(I) = I_0 (0.18 + 0.62 h/H)$$

I_0 radiation maximale théorique (1) (2)

H durée astronomique du jour (1) (2)

h durée d'insolation effective en h (ci-dessous)(2)

(1) valeurs théoriques en fonction de la latitude

(2) valeurs mensuelles

$h(H_r)$ facteur correctif n'intervenant que si $H_r < 50 \%$, ce qui n'est pas le cas à La Réunion (voir

Valeurs mensuelles de la radiation maximale et de la durée astronomique du jour à l'île de La Réunion

Ces valeurs ont été calculées d'après les tables d'Angot, en considérant l'île de La Réunion centrée sur la latitude 21° de latitude Sud.

Valeur /mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
IG	988.3	935.6	838.8	716.3	603.9	557.8	584.6	680.5	800.6	902.5	972.6	995.9
GH	412.3	360.8	378.9	348.0	344.8	325.3	340.8	354.2	359.5	389.4	393.8	414.7

2. INFLUENCE DE LA VARIATION DE LA TEMPERATURE (T) ET DE L'INSOLATION (I)
SUR LA VALEUR DE L'ETP TURC - Valeurs moyennes interannuelles 1971-1981

Nous avons testé pour quelques mailles de l'île l'influence de la variation sur T et I sur les valeurs de l'ETP.

ETUDE SUR LES VALEURS MOYENNES INTERANNUELLES

Ecart constant de températures : $T = T+2$; $T = T-2$

L'écart sur les ETP observées est d'autant plus grand que la valeur de T est faible ; il est vrai que l'écart relatif sur T augmente également.

* à I proche de 2400 h

$T = 23^{\circ}$ $T \pm 2^{\circ}\text{C}$ soit $T \pm 8.6 \%$ → ETP $\pm 3.5 \%$ ETP ± 46 mm

$T = 14^{\circ}$ $T \pm 2^{\circ}\text{C}$ soit $T \pm 14.3 \%$ → ETP $\pm 7.5 \%$ ETP ± 80 mm

$T = 9^{\circ}$ $T \pm 2^{\circ}\text{C}$ soit $T \pm 21.7 \%$ → ETP $\pm 14 \%$ ETP ± 115 mm

* à I variable

$I = 2368$ h $T = 17^{\circ}8$ C $T \pm 11.2 \%$ → ETP $\pm 5.2 \%$ ETP ± 60 mm

$I = 1683$ h $T = 16^{\circ}2$ C $T \pm 12.3 \%$ → ETP $\pm 6 \%$ ETP ± 55 mm

La variation de I jour sur la valeur globale de l'ETP, mais intervient sur l'écart d'ETP dû à un écart de T. En moyenne, un écart de $x \%$ sur T entraîne un écart de même signe de $x/2 \%$ sur ETP, l'écart absolu et l'écart relatif sur l'ETP sont d'autant plus élevés que T est faible.

Ecart relatif constant d'insolation : $I = I \times 1.2$; $I = I \times 0.8$

$T = 17.8^{\circ}\text{C}$ $I = 2368$ h $I \pm 20 \%$ $I \pm 475$ h → ETP $\pm 11.5 \%$ ETP ± 130 mm

$T = 16.2^{\circ}\text{C}$ $I = 1683.6$ h $I \pm 20 \%$ $I \pm 335$ h → ETP $\pm 9.8 \%$ ETP ± 92 mm

$T = 23.2^{\circ}\text{C}$ $I = 2490$ h $I \pm 20 \%$ $I \pm 500$ h → ETP $\pm 11.7 \%$ ETP ± 160 mm

$T = 9.2^{\circ}\text{C}$ $I = 2370$ h $I \pm 20 \%$ $I = 475$ h → ETP $\pm 11.5 \%$ ETP ± 95 mm

Quelque soit la valeur de T, une erreur de 20 % sur I entraîne une erreur d'environ 10 % sur ETP, erreur relative qui augmente avec la valeur absolue de I.

Maille	T	I	ETP	ET1=ETP(T+2)	ET2=ETP(T-2)	ET1 - ET2	EI1=ETP(Ix1.2)	EI2=ETP(Ix0.8)	EI1 - EI2
242	23.2	2491.2	1365.6	1409.5	1316.9	92.5	1526.3	1204.8	321.5
244	17.8	2368.8	1178.2	1240.9	1118.3	122.6	1319.7	1047.0	272.7
245	14.0	2371.2	1051.4	1124.9	967.0	157.9	1172.7	930.3	242.4
247	9.2	2370.	825.6	930.2	701.7	228.5	920.6	730.5	190.1
251	16.2	1683.6	938.3	991.1	878.1	113.0	1029.9	846.5	183.5

VARIATIONS SUR L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP Turc) DUES A DES INCERTITUDES SUR LES VALEURS MENSUELLES DE TEMPERATURE ET INSOLATION.

	T	I	ETP	ETP1 T=T+2	Ecart relatif sur T	ETP2 T=T-2	ETP1 -ETP2 E1	Ecart relatif E1/2ETP sur ETP	ETP3 I=Ix1.2	Ecart absolu sur I	ETP4 I=Ix0.8	ETP3 -ETP4 E3	Ecart relatif E3/2ETP sur ETP
	en °C	en h	en mm	en mm	en %	en mm	en mm	en %	en mm	en h	en mm	en mm	en %
<u>Maille 242</u>													
Janvier 75	26.4	211.2	130.4	133.8	7.6	126.6	7.2	2.8	144.8	42.2	115.9	28.9	11.1
Janvier 80	25.9	129.5	124.3	124.3	7.7	117.4	6.9	2.8	133.7	25.9	108.4	25.3	10.5
Août 76	20.9	213.7	101.8	105.7	9.5	97.5	8.2	4.	114.1	42.7	89.5	24.5	12.1
Août 72	21.	150.6	82.1	85.2	9.5	78.6	6.6	4.	90.5	30.1	73.7	16.8	10.2
<u>Maille 247</u>													
Janvier 77	12.4	212.5	98.4	106.5	16	89.	17.5	8.9	109.9	42.5	87.0	22.9	11.6
Août 71	5.3	212.6	44.5	55.7	38	30.7	25	28	49.7	42.5	39.2	10.5	11.8
Août 72	7.5	132.4	44.0	51.2	26.7	35.4	15.8	18	48.2	26.5	39.8	8.4	9.5
Janvier 74	10.4	131.7	69.4	76.7	19.2	60.8	15.9	11.5	75.8	26.4	63.0	12.8	9.2

On observe le même phénomène sur les valeurs mensuelles comme le montre le tableau ci-dessus des valeurs aux mailles 242 et 247.

Les répercussions sur la valeur de l'ETP d'une erreur sur la température ou l'insolation sont assez faibles.

L'insolation se comporte de façon assez homogène, une erreur de 20 % sur l'estimation de celle-ci entraîne une erreur d'environ 10 % sur l'ETP, et ceci quelque soit la valeur de la température, donc ce résultat est applicable à l'ensemble de l'île. Cet écart relatif augmente cependant avec la valeur absolue de l'insolation. Dans un cas de forte température et insolation (exemple : janvier 1981 à la maille 242 : $T = 26^{\circ}2$; $I = 293,6$ h, soit $ETP = 169$ mm). Un écart relatif de 20 % sur l'insolation entraîne un écart relatif de 13 % sur l'ETP, soit 22 mm.

Pour la température, nous préférons considérer un écart absolu constant, car la plus grande incertitude sur les valeurs correspondent aux postes d'altitude, c'est-à-dire ceux où la température est la plus faible ; avec un écart relatif donné (20 %), l'écart absolu serait d'autant plus fort que les valeurs seraient fortes (5° pour $25^{\circ}C$, 1° pour $5^{\circ}C$). Nous avons considéré un écart de $\pm 2^{\circ}$, ce qui est supérieur à l'erreur moyenne observée pour le poste de Bellecombe.

Pour les fortes valeurs de température, cet écart n'influence que très peu l'ETP (2 à 3 % pour $T = 26^{\circ}\text{C}$) ; par contre, étant donné que la température intervient dans le calcul de l'ETP par un facteur $(T/T+15)$, l'influence va augmenter avec la diminution de la température. Cet écart relatif pour l'ETP passe ainsi à 11 % environ à 10°C , près de 20 % à 7°C , et approche 30 % à 5°C .

C'est donc en altitude que l'incertitude sur l'ETP liée à l'indétermination de T est la plus grande. Mais, la valeur absolue de l'ETP diminuant avec T , l'écart absolue reste pour les exemples étudiés inférieur à 15 mm.

4me PARTIE

LES MODELES GLOBAUX DE SIMULATION DES BASSINS HYDROLOGIQUES
LEUR APPLICATION POUR VERIFIER LES DONNEES CLIMATIQUES (PLUIE ET E.T.P.)
ET EVALUER LA CAPACITE DE LA RESERVE DISPONIBLE POUR L'EVAPOTRANSPIRATION

Nous venons d'évaluer sur les différentes mailles de l'île les valeurs mensuelles de hauteur de pluie et de l'évapotranspiration potentielle sur la période 1971-1981. La confrontation de ces données, faisant également intervenir le stock d'eau disponible au sol, permet l'approche de la pluie efficace.

Malheureusement, les mesures de débits ne sont pas suffisamment généralisées sur toute l'île et les volumes d'eau transitant dans le sous-sol réunionnais n'étant pas connus, nous ne pouvons apprécier l'écoulement total, ni donc contrôler au niveau global de l'île les données de pluie efficace ainsi évaluées.

Cependant, quelques bassins hydrologiques sont jaugés et permettent régionalement de confronter les données de pluies et d'E.T.P. aux écoulements de surface.

La comparaison des modules moyens annuels n'aurait guère de signification, surtout dans le contexte climatique de l'île de la Réunion. Par contre, les modèles globaux de simulation de bassin permettent sur des pas de temps plus fins* de confronter ces différentes données de manière beaucoup plus significatives.

Une bonne simulation des débits observés à partir des données de hauteurs de pluie et d'E.T.P., calculées pour chaque bassin à partir des valeurs aux différentes mailles représentant ce bassin, accrédite ces données climatiques et l'évaluation qui en a été faite dans les parties précédentes.

Nous n'avons pas d'éléments nous permettant de quantifier précisément la capacité de la réserve en eau des sols disponible pour l'évapotranspiration ; or ce terme intervient comme un paramètre jouant sur la qualité de l'ajustement dans les modèles utilisés. Nous avons ainsi la possibilité de l'approcher régionalement et de juger de la précision de son appréciation.

* Nous avons, dans cette partie, utilisé les données mensuelles compatibles avec notre étude générale ; dans la sixième partie, nous utilisons un pas de temps journalier.

1. LES MODELES GLOBAUX A RESERVOIRS

1.1. Principe et schéma de fonctionnement

Les modèles à réservoirs doivent leur origine à l'allure exponentielle du tarissement des rivières (ou assèchement des nappes d'eau souterraines) qui s'apparente à une vidange de réservoir. Le comportement hydrologique des systèmes aquifères d'un bassin est analogue à celui d'un ensemble de réservoirs se vidangeant les uns dans les autres avec possibilité de débordement et de reprise par évapotranspiration (réservoirs supérieurs).

Les différents modèles utilisés permettent de simuler des données hydrologiques (indifféremment débits ou niveaux) à partir des données d'entrées (précipitation et évapotranspiration) par l'intermédiaire d'une fonction de production (bilan hydrique au sol) et d'une fonction de transfert (étalement dans le temps) (fig. IV.1 et annexe IV.1).

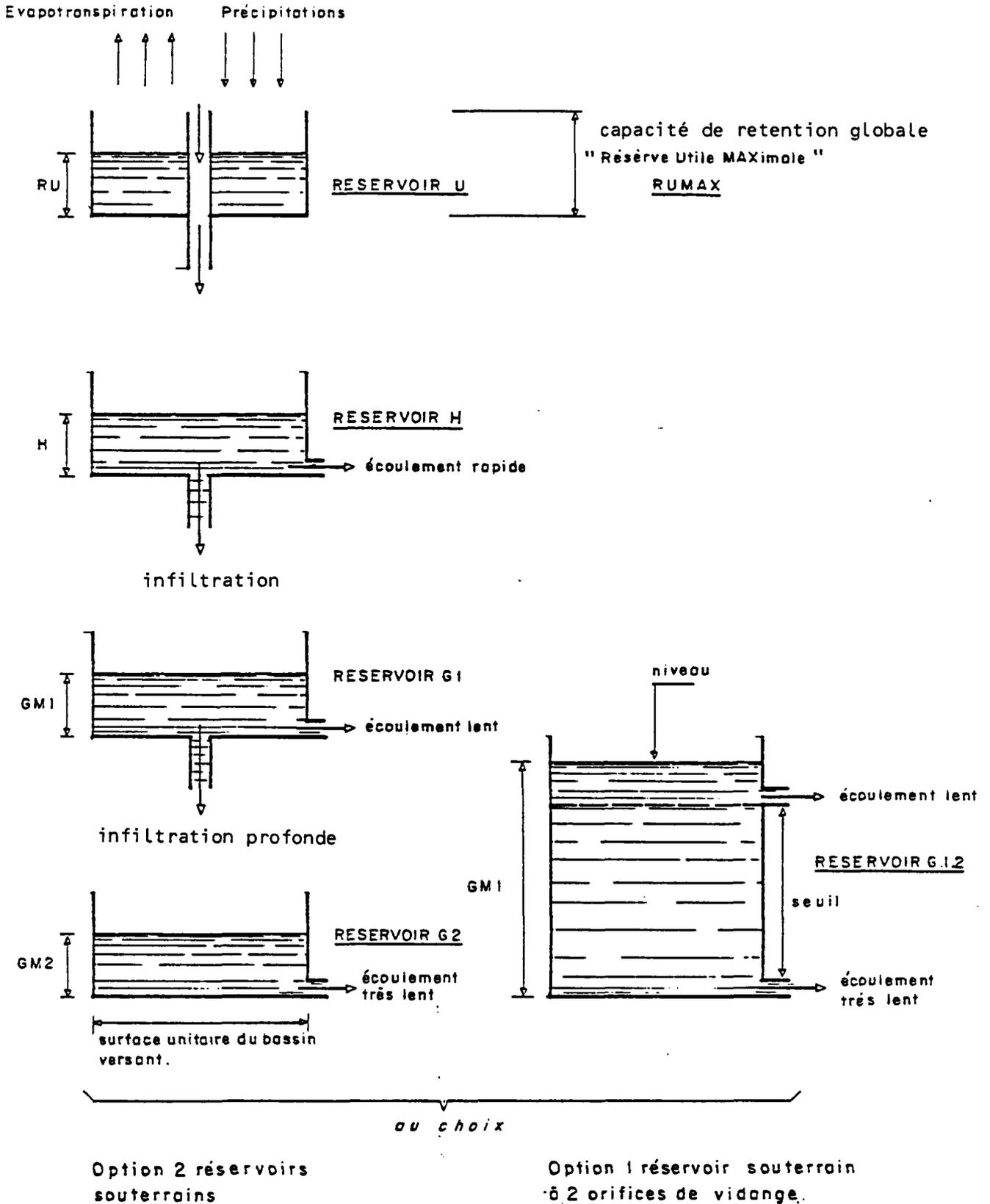
Ces modèles sont de types conceptuels : les équations de transfert du modèle correspondant à une schématisation des lois régissant les écoulements.

Cependant, du fait de la globalité de ces modèles, le bassin versant est une entité caractérisée par une lame d'eau, une hauteur d'eau reprise par évapotranspiration, un débit à l'exutoire (ou un niveau piézométrique) et des hypothèses simplificatrices permettant de représenter assez simplement la complexité du système hydrologique réel, il ne faut accorder aux paramètres du modèle qu'une signification physique globale (la capacité globale de rétention du sol n'est pas assimilable à la "réserve utile" définie par les agronomes).

1.2. Calage des modèles

L'ajustement des paramètres du modèle pour obtenir des débits (ou des niveaux) calculés aussi proches que possible des valeurs observées, constitue la phase de calage du modèle. Les paramètres sont optimisés par un processus itératif, à partir de valeurs initiales.

FIG. IV.1 - Modèle GARDENIA du B.R.G.M.
Schéma de fonctionnement



L'utilisateur dispose d'un critère numérique d'ajustement* (annexe IV.1) et d'un critère visuel par comparaison des courbes correspondantes à ces séries, et du détail des différents termes du bilan.

Les données climatiques sont obligatoirement ininterrompues, par contre les données de sortie peuvent présenter des lacunes. Cependant le calage est d'autant plus fiable qu'il porte sur un grand nombre de valeurs, et correspondant si possible à des situations contrastées (hautes eaux et basses eaux).

En fixant les valeurs initiales et la plage éventuelle de variations des paramètres ainsi que la possibilité de les faire optimiser ou pas, l'opérateur conserve la maîtrise de cette phase de calage. Il jugera après calcul de la vraisemblance des paramètres calculés et de la décomposition de l'écoulement qu'ils entraînent.

1.3. Applications des modèles

Les premières applications concernent la chronique étudiée :

- analyse des différents termes du bilan hydrique (vérification des données d'entrée, appréciation de l'infiltration),
- analyse des différentes composantes de l'écoulement.

Ce sont celles qui nous intéressent le plus pour notre étude, mais les modèles sont couramment exploités pour étendre les données dans le temps et dans l'espace.

- reconstitution de chroniques de débits (ou niveaux) à partir de séries observées, ou étendues statistiquement**, des données d'entrée,
- scénario d'évolution à partir de séries d'entrée correspondant à des situations moyennes ou à des temps de retour donnés ,
- étude de relation entre les paramètres du modèle et des facteurs physiographiques du bassin, dans l'optique de transposition à des bassins versants voisins non jaugés.

* Dans le cas du modèle GARDENIA du B.R.G.M., un coefficient de pondération permet de donner une importance relative variable aux faibles valeurs vis-à-vis des fortes (pour limiter l'effet des crues souvent mal mesurées ou mal simulées avec un pas de temps pas assez fin).

** Contrairement aux débits, les totaux de hauteurs de pluie peuvent, au pas de temps mensuel, être considérés comme approximativement indépendants. Pour chaque mois, on peut générer des pluies par un tirage au hasard en fonction des lois de distribution des pluies de ce mois.

2. APPLICATION A QUELQUES BASSINS VERSANTS DE LA REUNION

Nous disposons du suivi hydrométrique plus ou moins complet de 11 bassins hydrologiques sur la période 1971-1981. En fait, deux rivières seulement, la rivière des Marsouins (11 ans) et la rivière Langevin (9 ans), présentent des chroniques assez étendues ; sur les autres bassins, seulement 2 à 4 années de mesures sont disponibles.

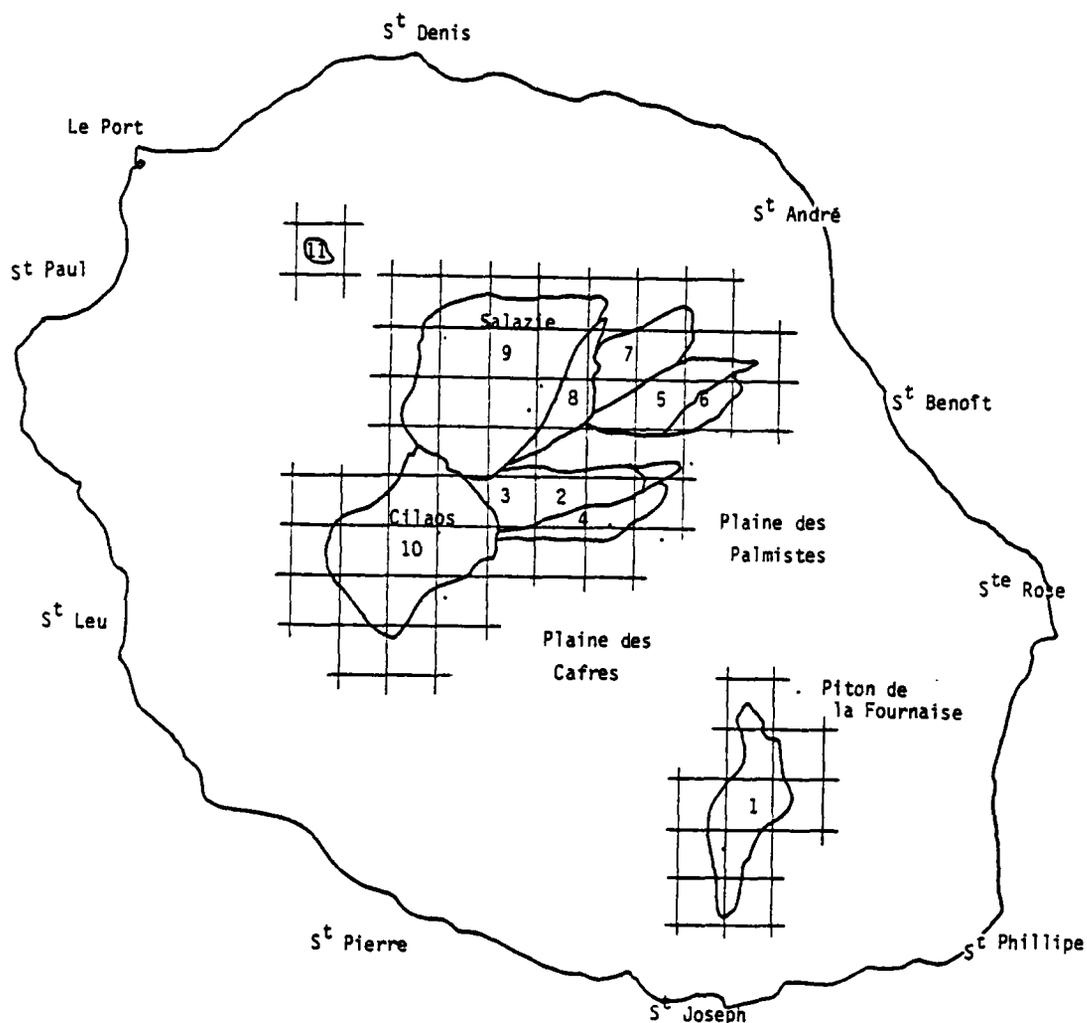


FIG. IV.2 - Localisation des bassins hydrologiques étudiés

- | | |
|----------------------------------|----------------------|
| 1. Rivière LANGEVIN | 7. Bras des LIANES |
| 2. Rivière des MARSOUINS | 8. Bras de CAVERNE |
| 3. Rivière des MARSOUINS (amont) | 9. Rivière du MAT |
| 4. Bras CABOT | 10. Bras de CILAOS |
| 5. Rivière des ROCHES | 11. Ravine à MARQUET |
| 6. GRAND BRAS | |

2.1. Présentation sommaire des bassins (fig. IV.2)

2.1.1. Rivière Langevin - Massif de la Fournaise (1)

Le bassin versant de cette rivière se situe dans le quart Sud-Est sur le massif du Piton de la Fournaise. Les formations géologiques affleurantes (coulées et projections pouvant être altérées en sable, formations détritiques dans la vallée) présentent une perméabilité en grand sur la majorité du bassin. Absente sur le secteur amont (plaine des sables), la végétation boisée apparaît sur les remparts, remplacée par les cultures vivrières dans la vallée. Le doute demeure quant à l'étendue du bassin versant réel et de la possibilité d'alimentation par le flanc Sud-Ouest du cratère Bory.

2.1.2. Rivière de la côte au vent sur les Hauts de St-Benoit (2 à 8)

Les bassins de ces rivières s'étendent sur le flanc externe Est du Piton des Neiges. Les coulées de la dernière phase de ce massif constituant l'essentiel des affleurements dans les secteurs amont (rivière des Marsouins, Hauts du bras de Caverne et de la rivière des Lianes) sont très perméables (tendance à favoriser l'infiltration). Par contre, les formations plus anciennes (phase II du Piton des Neiges) réapparaissent à l'aval ; fortement altérées, elles sont plutôt imperméables, assurant ainsi une prépondérance du ruissellement (rivière des Roches notamment).

La forêt dense des bois de couleur constitue tout le secteur aval de ces bassins jaugés jusqu'à 1700 m environ. Cette végétation se rabougrit progressivement pour disparaître vers 3000 m environ.

2.1.3. Rivières drainant des cirques du Piton des Neiges - Rivière du Mat (9) et Bras de Cilaos (10)

L'érosion qui a permis de former ces reliefs au coeur même du Piton des Neiges est à l'origine de la majorité des formations superficielles de l'intérieur des cirques. Rassemblées sous le terme d'ensemble d'épandage par BILLARD, ces formations sont généralement très perméables et peu cohérentes. Elles reposent sur les coulées zéolitisées des premières phases d'activité du Piton des Neiges qui constitueraient un imperméa-

ble généralisé (BILLARD [1]). Ces coulées anciennes constituent les remparts des cirques. Les formations plus récentes, correspondant à la série différenciée, affleurent au niveau du Piton des Neiges et dans Salazie au Piton d'Enchain. La végétation boisée se concentre surtout au piémont des remparts, et se rabougrit progressivement pour disparaître aux sommets. Au fond des cirques, la végétation est également de densité moyenne, pratiquement absente des zones ravinées, elle se concentre sur les "ilets" (culture vivrière).

2.1.4. La ravine à Marquet - côte sous le vent (11)

En rive droite de la rivière des Galets, au débouché du cirque de Mafate, le bassin versant de la ravine à Marquet est un amphithéâtre d'érosion régressive protégé des vents d'Est par les Hauts de St-Denis et la planèze de la Roche Ecrite.

Les remparts sont constitués par les coulées indifférenciées du Piton des Neiges (phase II de BILLARD) ; dans le fond de la dépression, s'accumulent les formations détritiques issues du démantèlement des remparts, et vers l'aval du secteur jaugé des tuffs de la phase terminale du Piton des Neiges. La végétation présente une densité moyenne (prairies et culture vivrière en fond de cuvette, secteurs boisés sur les remparts).

2.2. Simulations des écoulements mensuels

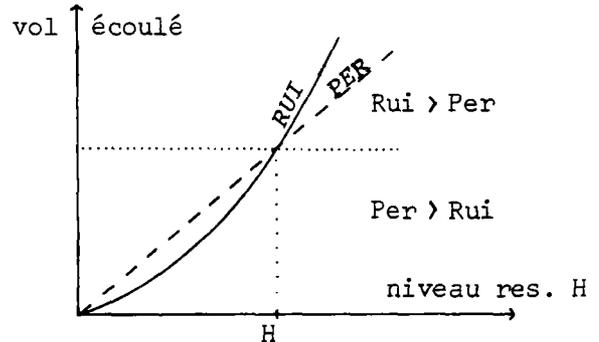
2.2.1. Mise en oeuvre

Nous utilisons pour cette simulation à pas de temps mensuel le modèle GARDENIA [7].

En données d'entrée, pluie et E.T.P., nous considérons pour chaque bassin et à chaque pas de temps, les moyennes des valeurs aux différentes mailles constituant le bassin considéré, pondérées par leur surface respective.

Dix paramètres peuvent être optimisés par le modèle :

- Deux coefficients correcteurs, un sur les pluies, l'autre sur les ETP, permettent de rendre compte d'une éventuelle sur- ou sous-estimation globale des données d'entrée ; toute la série des valeurs est affectée de ce coefficient.
- Six paramètres dimensionnels caractérisant les différents réservoirs :
 - . capacité de la réserve disponible pour l'évapotranspiration (capacité de rétention globale), en mm,
 - . hauteur d'égale répartition, en mm, entre écoulement superficiel et percolation alimentant l'écoulement souterrain ; au delà de cette valeur prépondérance de l'écoulement superficiel ; en deçà, prépondérance de la percolation ;
 - . temps de demi-concentration du débit souterrain, en mois ; il est lié au temps de réaction entre une pluie efficace et l'accroissement correspondant du débit souterrain,
 - . temps de demi-tarissement de la composante rapide de l'écoulement souterrain, en mois,
 - . temps de demi-transfert entre le réservoir souterrain de la composante rapide et celui de la composante lente, en mois, ou si ces deux composantes émanent d'un unique réservoir, c'est le seuil, en mm, en deçà duquel ne subsiste que la composante lente,
 - . temps de demi-tarissement de la composante lente, en mois.
- les deux derniers paramètres sont calculés, sur option, à partir de l'équation de régression linéaire définie entre le débit observé et le débit calculé :
 - . en débit extérieur constant, en m^3/s ,
 - . la surface du bassin versant, en km^2 ; en général, il s'agit de la superficie du bassin versant topographique, ce paramètre est grossièrement le rapport entre la pluie efficace et l'écoulement total.



Pour ajuster le débit moyen, le modèle peut jouer sur les données d'entrée, P et E.T.P., pour modifier la pluie efficace, ou sur la surface si elle est mal connue. Il ne faut pas laisser optimiser simultanément ces différents paramètres, car leurs effets pourraient se compenser.

Remarque. En laissant optimiser les superficies, on peut trouver des valeurs très différentes des superficies réelles des bassins versants. Ceci n'a, le plus souvent, pas de réalités physiques. C'est un artifice qui permet de prendre en compte des pertes par infiltration, ou au contraire des apports par un bassin voisin, proportionnels à la pluie efficace donc très variables au long de l'année contrairement au paramètre précédent, le débit extérieur, qui est constant quelle que soit la pluviosité considérée. Il ne faut alors pas s'attacher à la valeur de la "superficie calculée", mais au RAPPORT superficie calculée/mesurée.

2.2.2. Résultats

Il n'est possible de déterminer précisément les données d'entrée que si l'on n'a une définition rigoureuse de la superficie du bassin versant et la certitude que toute la pluie efficace (voir introduction) est contrôlée à l'exutoire mesuré de ce bassin, et réciproquement.

Dans un premier temps, nous avons fixé la superficie des bassins à la valeur des bassins versants superficiels et laisser optimiser les coefficients correcteurs sur les pluies et les E.T.P. (tableau V.1).

Si les corrections sur les pluies sont très plausibles pour les bassins 5, 8, 9 et 10 (inférieurs à 10 %), les très fortes valeurs de ces coefficients observés sur les autres bassins ne sont pas réalistes. Il en est de même pour les coefficients correcteurs d'E.T.P. qui sont souvent de l'ordre de 50 %.

Un des résultats les plus intéressants apparaît en comparant les valeurs de ces coefficients calculés pour la rivière des Marsouins (bassins 2 et 3) et son affluent le Bras Cabot (bassin 4). Ces deux bassins voisins, situés dans le même contexte géographique, auraient, d'après ces résultats, des hauteurs de pluies et d'E.T.P. très différentes. Cela nous paraît inconcevable et nous incite à laisser optimiser la superficie des bassins. Ceci permet d'expliquer des transferts souterrains entre bassins voisins, des pertes par infiltration profonde non contrôlées aux stations de jaugeage. L'altitude assez élevée de ces stations de jaugeage (annexe IV.2), l'absence sur bien des bassins de substratum imperméable généralisé et la perméabilité en grand de la plupart des formations géologiques rencontrées (cf chap. I.1), sont des arguments qui nous ont incité à envisager cette possibilité.

En jouant ainsi sur l'optimisation successive des différents paramètres, tout en conservant des résultats plausibles, nous avons affiné les simulations pour obtenir les valeurs présentées sur les figures IV.3 à IV.7. Les jeux de paramètres correspondants sont repris dans le tableau IV.2.

Les coefficients d'ajustement sont relativement élevés pour la plupart des bassins étudiés ; cependant, la comparaison visuelle des séries observées et calculées conduit à relativiser ces résultats (fig. IV.3) : les coefficients d'ajustements sont d'autant plus significatifs qu'ils concernent une chronique étendue et variable (plusieurs cycles de périodes de crues-tarissement). Les coefficients très élevés observés sur les bassins de la côte Est (n° 3 à 9) ne sont pas garants d'une simulation parfaite avec détermination rigoureuse des différents paramètres. La simulation des écoulements de la rivière des Marsouins (n° 2) est beaucoup plus significative (porte sur 11 années de mesures).

Par contre, des coefficients d'ajustement assez faibles témoignent de l'impossibilité pour le modèle de simuler les écoulements à partir des données d'entrée fournies. La simulation des débits de la rivière Langevin laisse subsister des doutes, celle relative au Bras de Cilaos est médiocre et ne permet en aucun cas de conclure.

Malgré les différentes combinaisons de paramètres essayées, la simulation des écoulements sur la rivière Langevin reste assez imprécise. Cette simulation apparaît de qualité très variable selon les années (fig. IV.3) avec certaines valeurs bien restituées (1977 et fin 1978- début 1979) et des périodes de sur-évaluation (fin 1975, 1979) ou de sous-évaluations (1973, début 1978).

Les débits de la rivière des Marsouins sont bien simulés par le modèle, la simulation est aussi bonne pour les crues que les étiages (fig. IV.4) ; il est regrettable que la crue consécutive au cyclone Hyacinthe (janvier 1980) n'ait pas été enregistrée.

TABEAU IV.1 - Première simulation des débits sur les bassins n° 2 à 10, à pas de temps mensuel
Surface des bassins versants - Optimisation des coefficients correcteurs sur P et ETP

Bassin	Surface fixée	Coefficients d'ajustement	Correction sur les		Réserve maximale	Observations
			Pluies en %	E.T.P. en %		
2	27.5	0.95	+ 50 %	- 20 %	50	Manque important d'eau
3	25.8	0.99	+ 40 %	- 50 %	0	Manque important d'eau
4	15.5	0.92	- 14 %	46 %	180	Surplus
5	23.8	0.99	+ 4 %	46 %	0	Surplus à l'étiage et léger manque en pointe : Mauvaise optimisation
6	7.1	0.99	- 27 %	50 %	105	Surplus important
7	17.7	0.98	+ 55 %	3 %	45	Manque important
8	15.8	0.99	+ 9 %	46 %	46	Voir bassin n° 5
9	88.4	0.88	+ 10 %	--	0	Léger manque
10	70	0.66	0	5 %	5	

TABEAU IV.2 - Simulation mensuelle des débits sur 11 bassins de La Réunion
Paramètres intervenant au niveau de la fonction production du modèle

N° du bassin	Nb de valeur	Coeff. ajustement	Coeff. ajustement pondéré **	Coeff. correcteur sur pluie en %	Coeff. correcteur sur E.T.P. en %	Réserve globale maximum en mm	Surface estimée par le modèle	Surface du bassin versant topograph.	Valeurs moyennes interannuelles 1971-1981	
									lame d'eau	E.T.P.
1	108	0.89	0.88	0	20	130	19.4	36	4074	1031
2	126	0.98	0.95	0	0	100	49.9	27.6	4141	909
3	23	0.99	0.99	0	10	116	45	25.8	3920	905
4	25	0.95	0.94	- 5	10	87	12.8	16.5	4763	936
5	21	0.99	0.98	0	- 5	44	23.2	23.8	6114	1034
6	27	0.99	0.97	- 5	10	49	5.5	7.1	7237	1004
7	26	0.99	0.98	50	-10	40	16.7	17.7	4667	1052
8	27	0.99	0.96	5	10	0.5	18	15.8	3198	980
9	22	0.96	0.93	10	-10	6	102	88.4	3035	1007
10	29	0.74	0.76	0	-20	50	65	68.7	2000	973
11	25	0.99	0.98	0	5	210	1.24	2.33	2067*	975*

* sur la période 1981-1982

** l'optimisation est effectuée sur ce coefficient dont la pondération minimise l'effet des fortes valeurs (annexe IV.1).

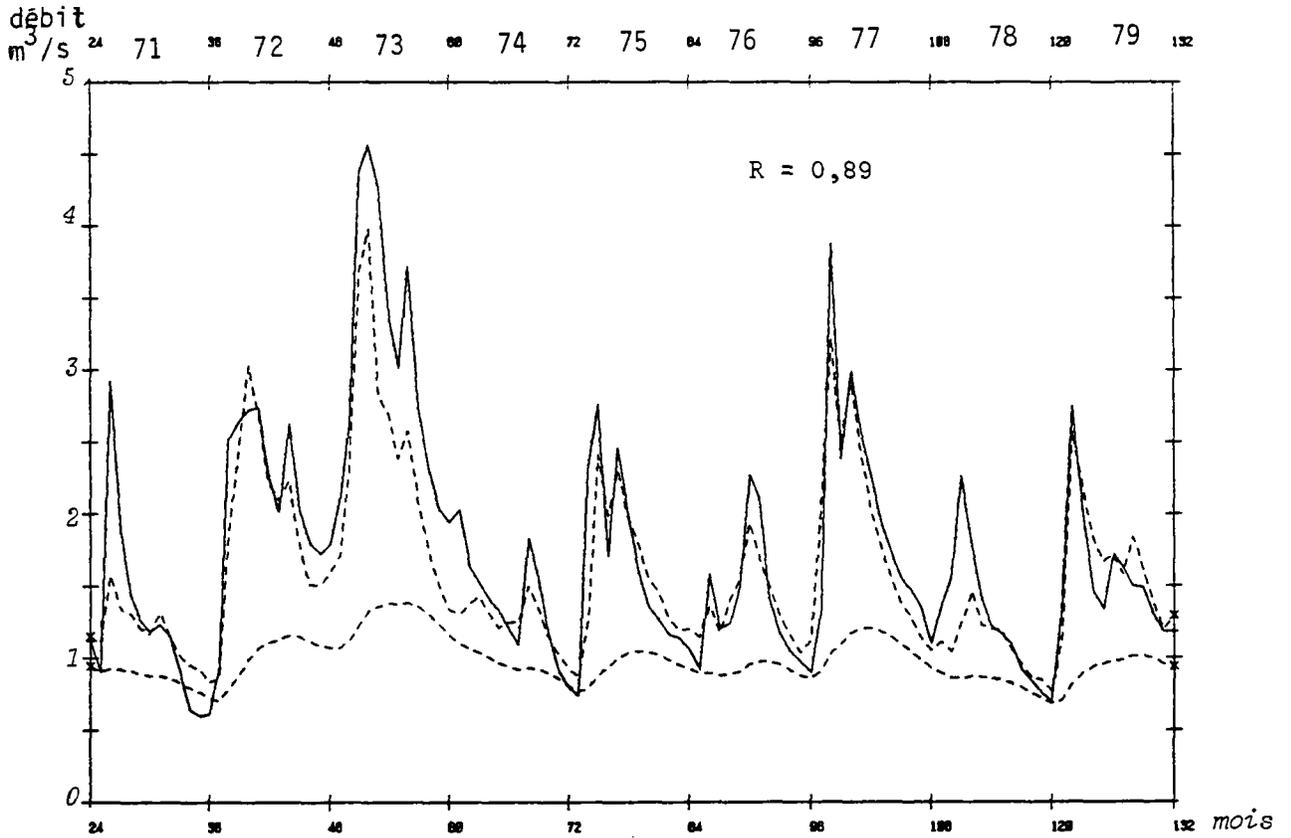


FIG. IV.3 - Simulation des débits de la rivière Langevin : bassin n° 1
(---) valeurs simulées (—) valeurs observées

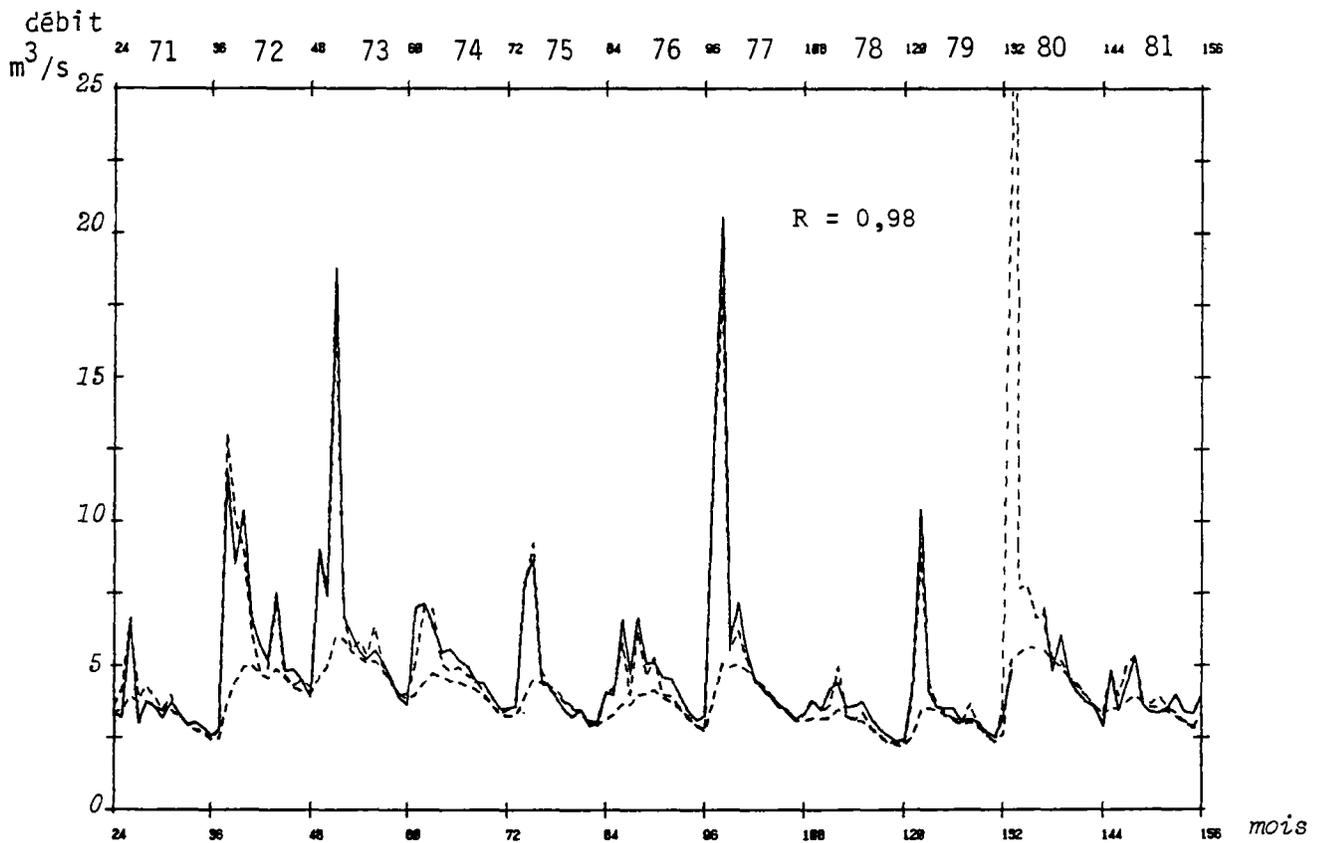
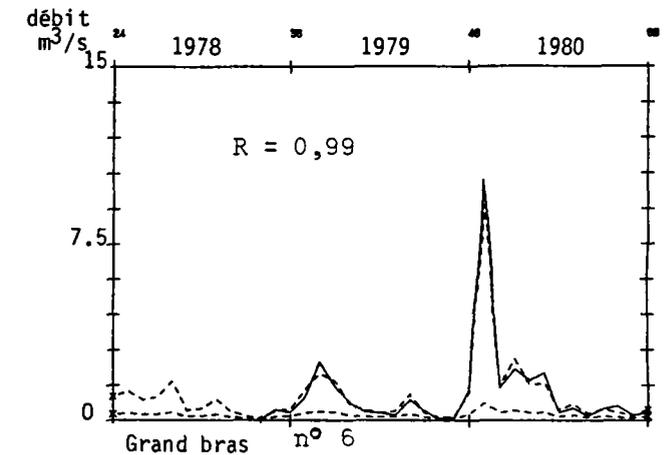
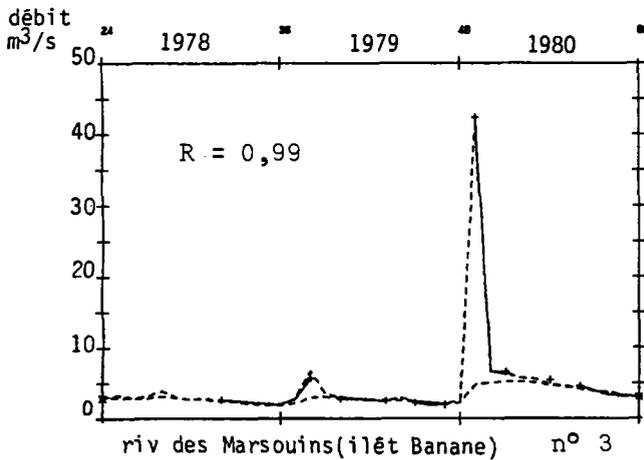
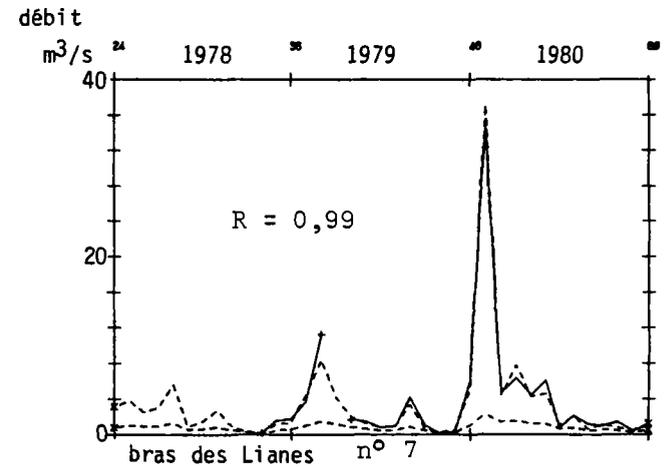
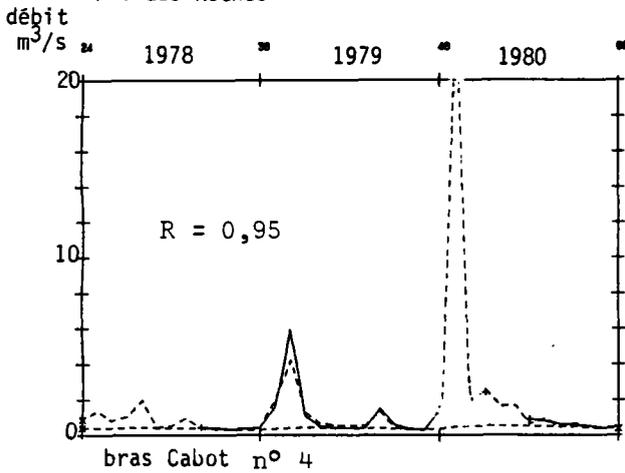
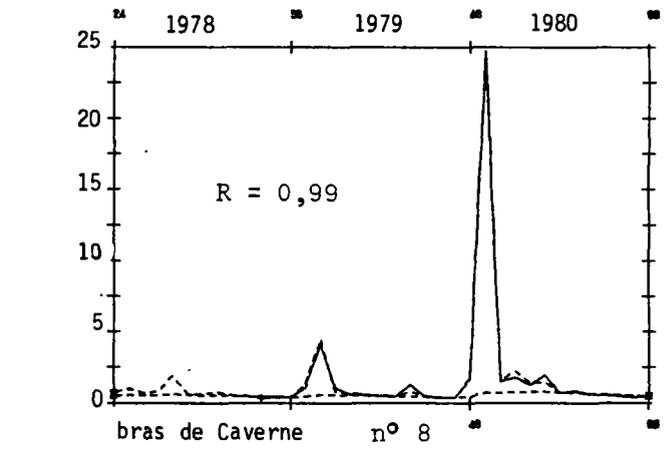
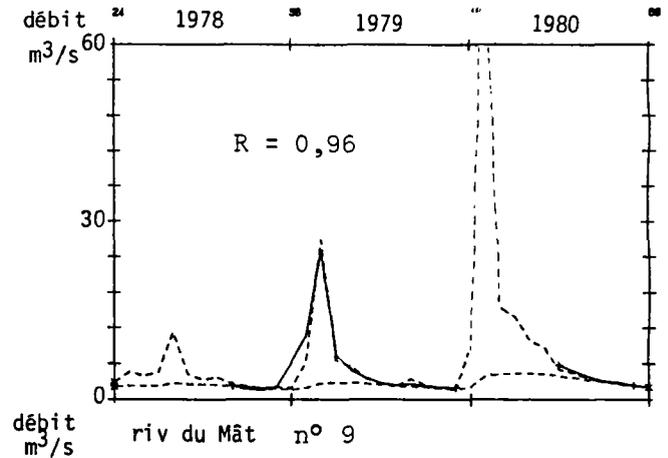
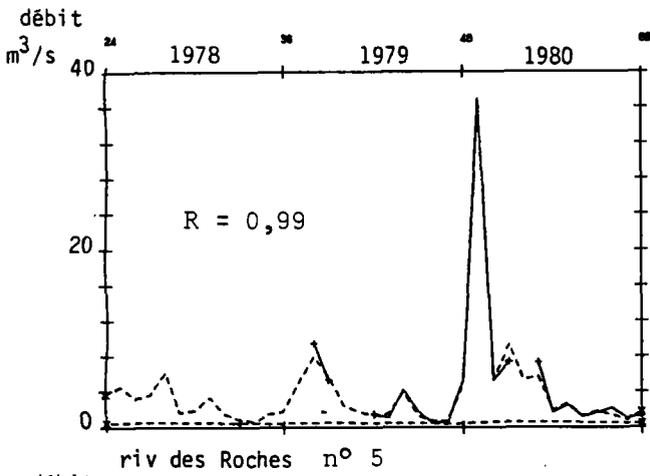


FIG. IV.4 - Simulation des débits de la rivière des Marsouins : bassin n° 2
(---) valeurs simulées (—) valeurs observées

FIG. IV.5 - Simulation des débits
des rivières de la côte
Est (1978-1980)

(---) valeurs simulées
(—) valeurs observées



Les bassins de la côte Est sont tous relativement bien simulés (fig. IV.5). Les critères d'ajustement les plus faibles correspondent au bras Cabot et à la rivière du Mât dont les valeurs de janvier 1980 n'ont pas été enregistrées. La crue de 1979 n'est pas restituée très précisément sur toutes les rivières, mais les écarts restent modestes (quelques m^3/s).

Le bras de Cilaos n'est pas très bien simulé (coefficient d'ajustement = 0.75). Il n'y a pas cependant d'écarts importants sur les valeurs observées, seules les légères pointes de janvier 1978 et juin 1980 ne sont pas prises en compte par le modèle (fig. IV.6) et nous n'avons pas diversifiés les essais sur ce bassin.

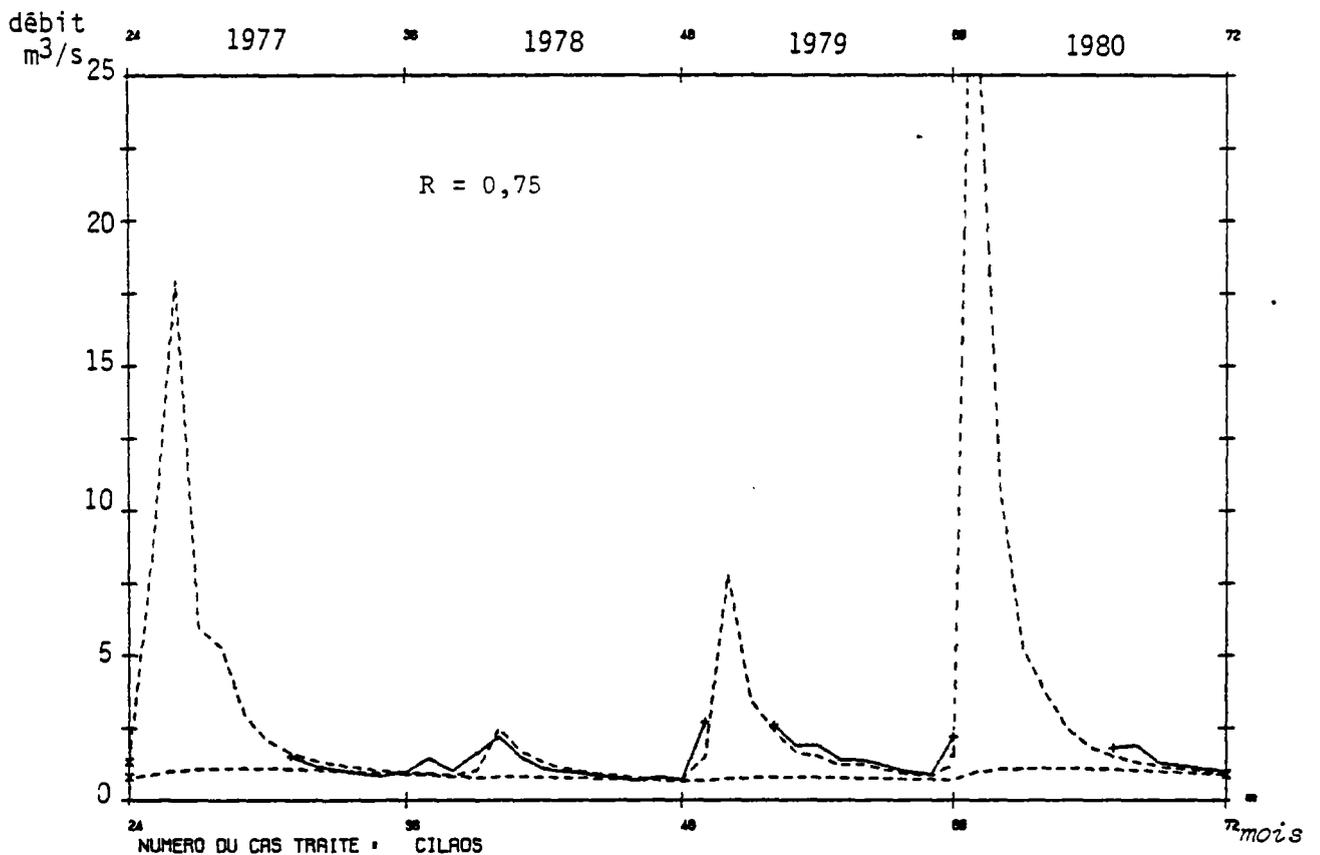


FIG. IV.6 - Simulation des débits du bras de Cilaos (1977-1980) (bassin n° 10)
valeurs simulées (---) valeurs observées (—)

La chronique des débits observés sur la ravine à Marquet est bien restituée par le modèle. Bien qu'il n'y ait que deux années de mesures, la diversité des débits observés garantit une certaine fiabilité de cette simulation ; toutes les phases d'augmentation et diminution du débit, quelle que soit leur amplitude, sont simulées par le modèle (fig. IV.7), l'écart le plus important apparaît en novembre 1982 : 20 l/s (calculé) au lieu de 33 l/s (observé).

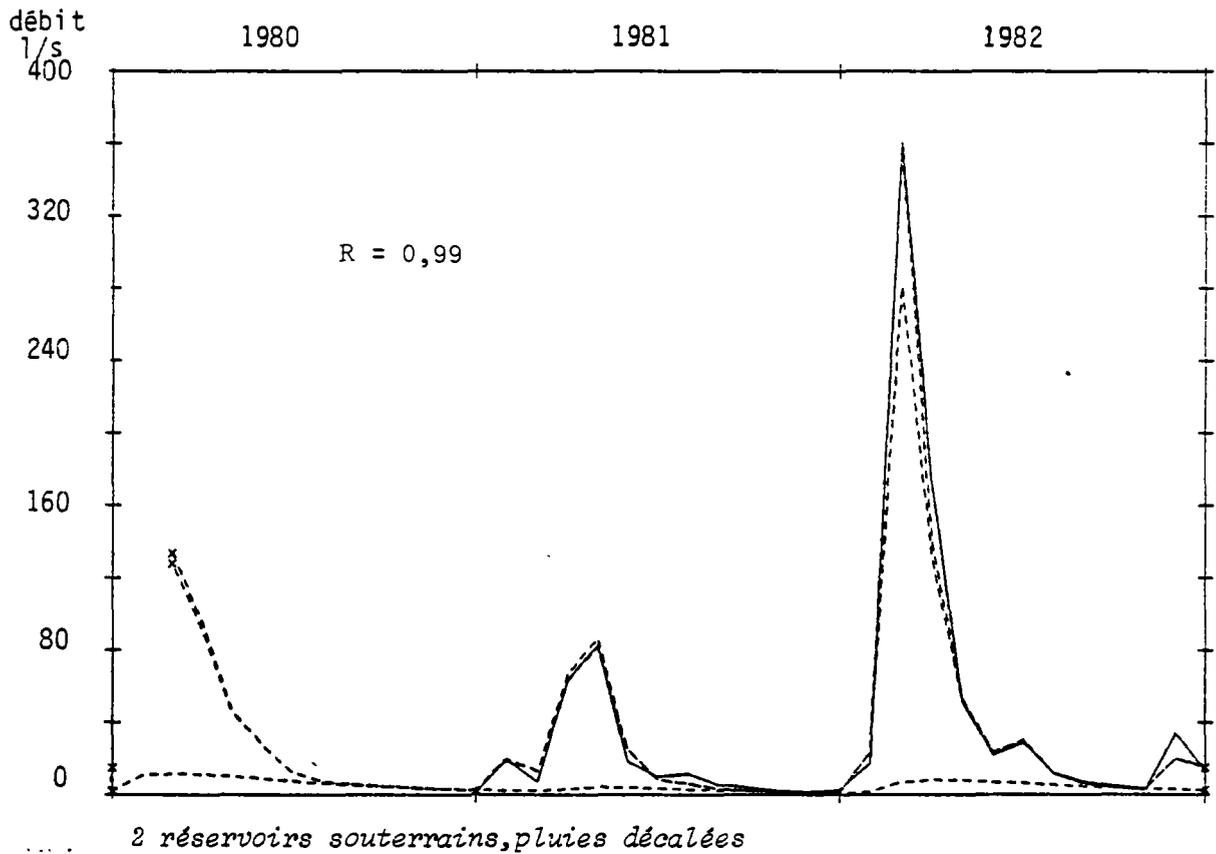


FIG. IV.7 - Simulation des débits de la ravine à Marquet (1981-1982) (bassin n° 11)
valeurs simulées (---) valeurs observées (—)

3. VERIFICATION DES DONNEES CLIMATIQUES

3.1. Etude des lames d'eau

3.1.1. Rivière Langevin

Pour la rivière Langevin, nous avons considéré que la lame d'eau était correctement évaluée. Ceci conduit à estimer une surface qui ne représente guère plus de la moitié du bassin versant réel, ce qui implique qu'il y a pratiquement autant d'eau qui échappe à la mesure à la station de jaugeage qu'il y en a de mesuré ; 45 % de la pluie efficace constitueraient l'infiltration profonde. Cette proportion semble considérable et la sur-évaluation de la lame d'eau pourrait expliquer une partie de ce phénomène, mais il n'est guère concevable que cette erreur sur l'évaluation de la pluie excède 10 à 15 %.

Nous avons cependant effectué un calage du modèle en considérant la pluviométrie de la station de Grand Galet représentative du bassin (cette station, dans le secteur aval du bassin, doit en fait représenter les valeurs les plus faibles du bassin (fig. IV.9)).

Ce calage ne donne pas de bons résultats. Seuls les débits des années 1978 et 1979 sont assez bien reconstitués (fig. IV.8).

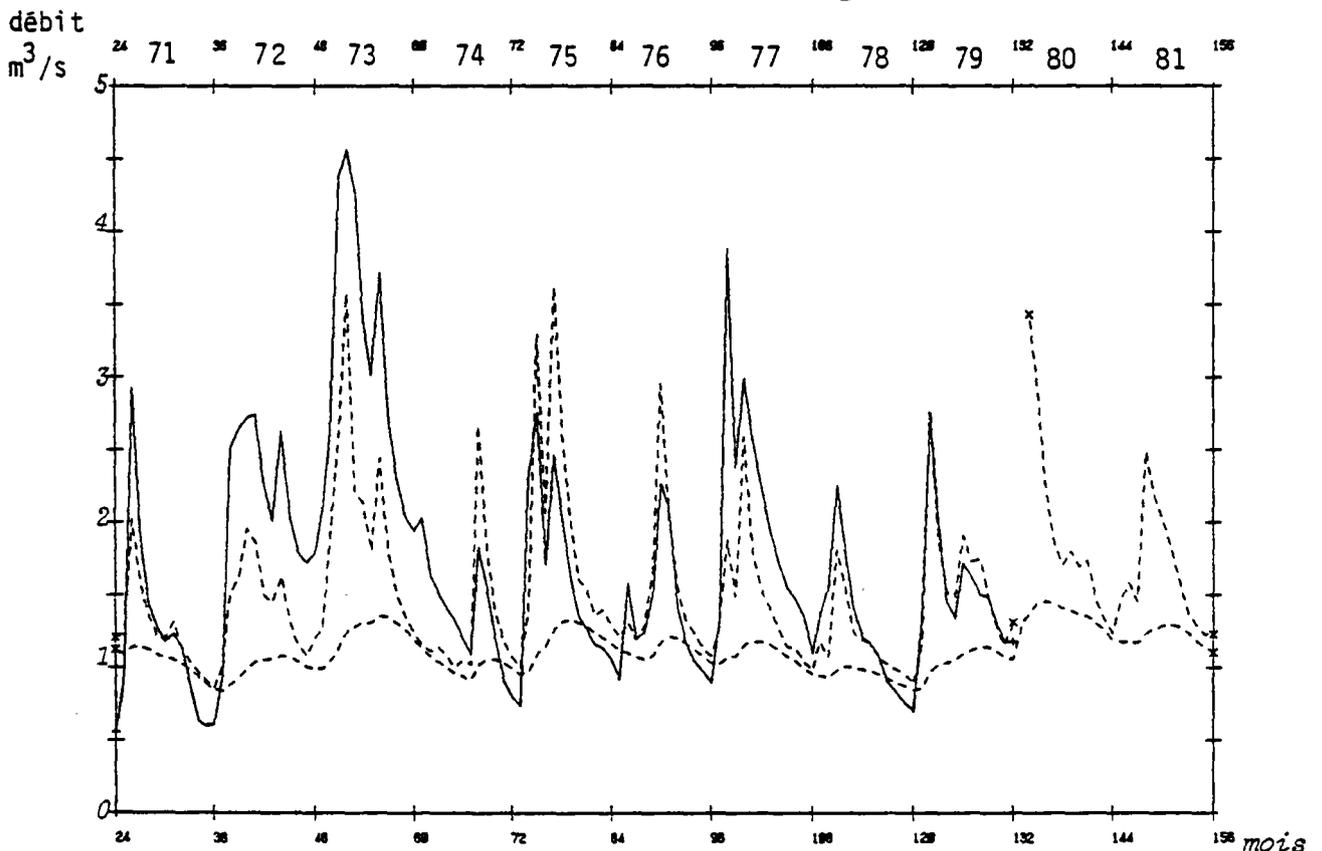


FIG. IV.8 - Simulation des débits de la rivière Langevin en considérant la lame d'eau mesurée à la station de Grand Galet

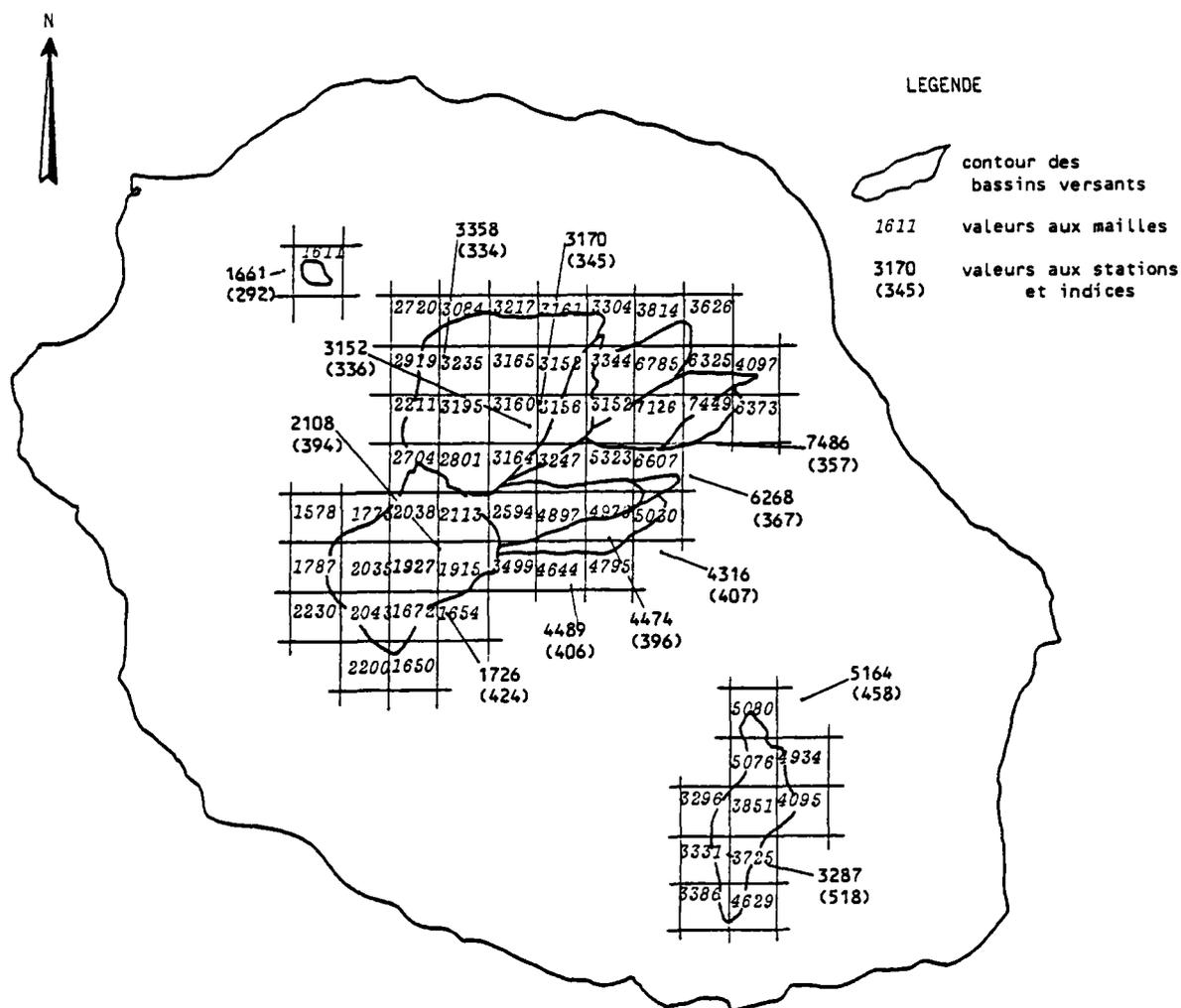


FIG. IV.9 - Valeurs moyennes annuelles des hauteurs de pluie aux mailles constituant les bassins versants étudiés ainsi qu'aux stations proches

Période 1971-1981

Le critère d'ajustement est très médiocre (0.67) et la surface est toujours estimée avec le même ordre de grandeur (20 km²), ce qui conduirait à des pertes par infiltration profondes similaires.

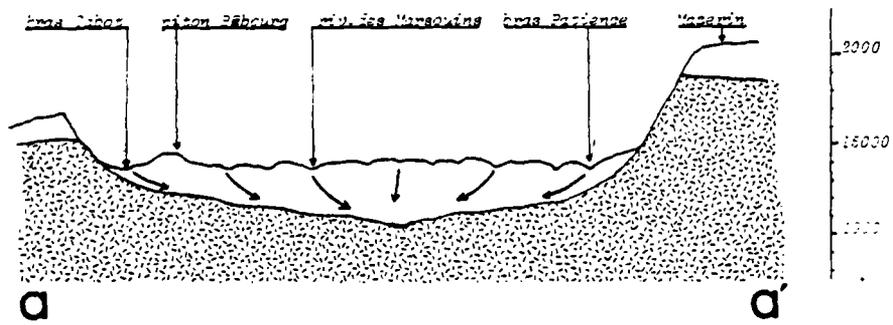
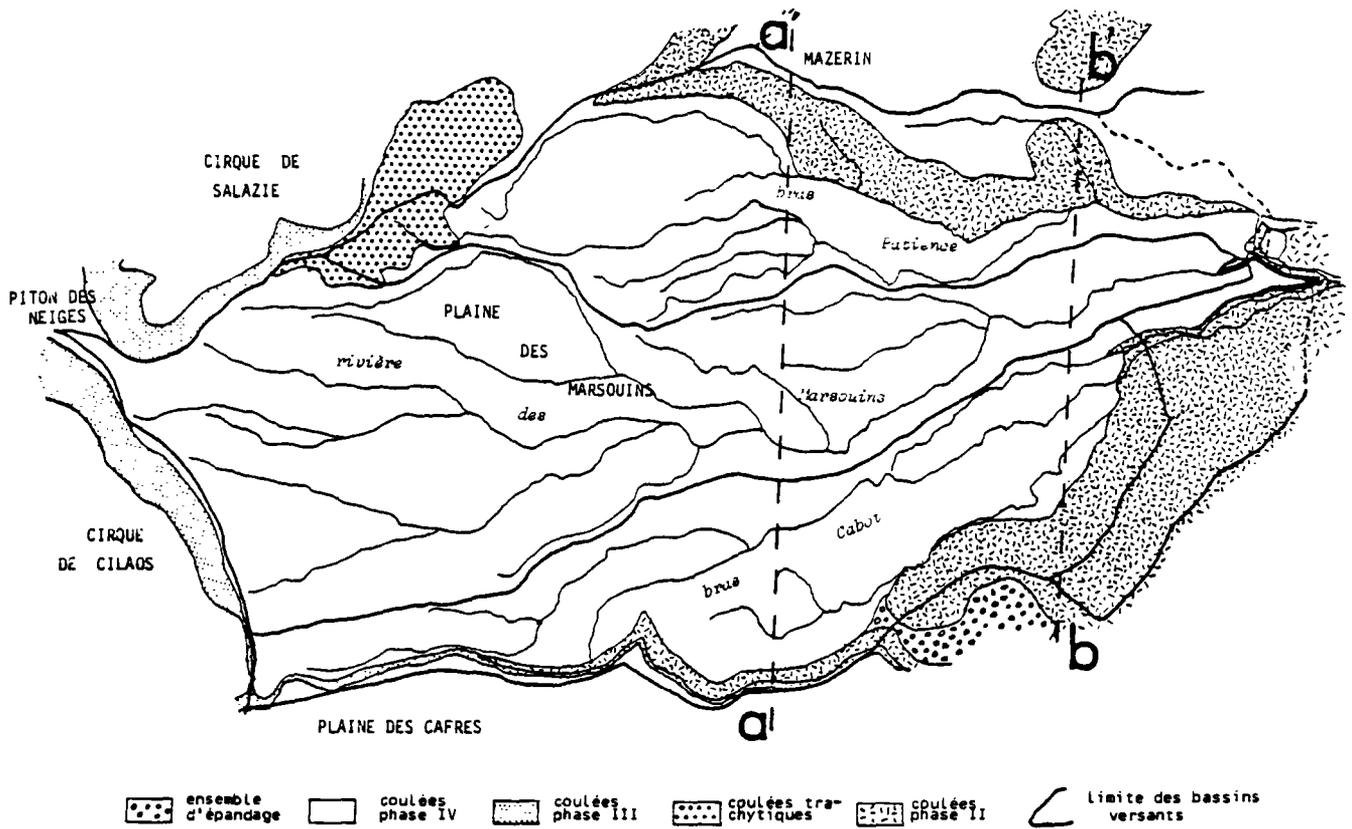
En considérant la lame d'eau moyenne des différentes mailles constituant le bassin, on obtient des résultats plus satisfaisants même si l'irrégularité de cette simulation (cf fig IV.3) laisse supposer que cette évaluation n'est pas rigoureuse. Effectivement les postes pluviométriques du secteur amont du bassin trop incomplets n'ont pas été pris en compte dans l'étude générale de la pluie (cf chapitre II).

La distribution mensuelle de la lame d'eau considérée permet cependant de rendre compte correctement des variations des débits observés sur la rivière Langevin.

3.1.2. Rivière des Marsouins et bras Cabot

Nous avons simulé simultanément les bassins de la rivière des Marsouins et du bras Cabot. Compte-tenu de nos connaissances actuelles sur la distribution spatiale des pluies (chap. II et fig. IV.9), le bassin du bras Cabot semble plus arrosé que celui de la rivière des Marsouins (gradients inverses de pluviométrie au delà de 1200-1500 m). Il ne nous a donc pas semblé logique de remettre totalement en cause les valeurs obtenues par pondération à partir des différentes mailles et avons limité le coefficient correcteur sur les pluies à quelques pourcents.

Nous obtenons ainsi pour les surfaces apparentes de ces bassins une augmentation de 80 % pour la rivière des Marsouins, et une diminution de 25 % pour le bras Cabot par rapport à la surface respective de leur bassin topographique. Sans accorder une très grande précision à ces chiffres, ils impliquent des transferts souterrains entre les différents bassins constituant le bassin amont de la rivière des Marsouins. Une partie de la pluie tombée sur les bassins du bras Cabot et du bras Patience (fig. IV.10) s'infiltré et rejoint le paléo-réseau de la rivière des Marsouins. Différents arguments sont en accord avec cette hypothèse.



Infiltration au niveau des coulées basaltiques perméables de la phase IV. Les eaux de percolation sont probablement collectées par le paléoréseau hydrographique au toit de la phase II (paléosol d'altération à caractère imperméable).

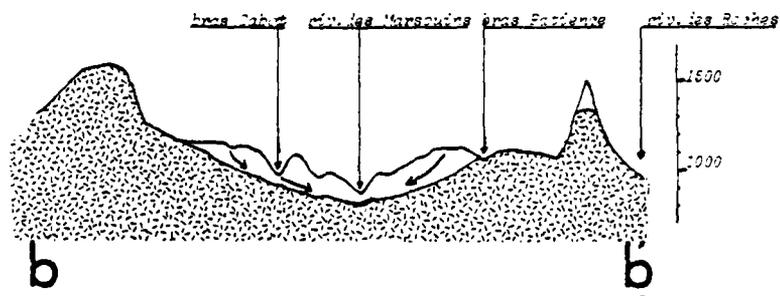


FIG. VI.10 - Géologie sommaire du bassin versant amont de la rivière des Marsouins et coupes interprétatives

Etudes antérieures. LE GOURRIERES [3] , suite à la campagne hydrologique de l'ORSTOM en 1959-1961, concluait au sujet de la rivière des Marsouins, après avoir obtenu un coefficient moyen d'écoulement de 1.27 : *"Bien que les précipitations soient mal connues, ce résultat peut s'expliquer par le fait que le bassin d'alimentation réel est plus étendu que le bassin versant géographique apparent... et s'étend sous les bassins du bras Patience et du bras Cabot.* .

"L'ancien réseau hydrologique... recouvert par les dernières éruptions ... continue vraisemblablement à fonctionner".

Géologie - Hydrogéologie. Les laves basaltiques de la dernière phase d'activité du Piton des Neiges, constituant les affleurements de tout l'amont du bassin, sont perméables en grand. Les formations ont pratiquement comblé une dépression qui aurait constitué un quatrième cirque (fig. IV.10) : le cirque des Marsouins (Billard [1]). Le "substratum", constitué des basaltes anciens, a subi une évolution pédologique à altération argileuse en surface et joue le rôle d'imperméable ; il apparaît dans le cours moyen de la rivière des Marsouins au niveau des stations de jaugeage. Ce paléo-sol et le paléo-réseau hydrographique de la rivière des Marsouins collecte l'eau qui s'infiltré dans les formations sus-jacentes.

Hydrologie. Les sources importantes apparaissent dans le cours moyen de la rivière des Marsouins (affleurement de phases anciennes) et elles ont un tarissement très lent et soutenu (débit moyen d'étiage au barrage E.D.F. supérieur à 2 m³/s). Par contre les bras Patience et Cabot ont à l'étiage des débits insignifiants (étude ORSTOM [3]). Le débit du bras Cabot n'augmente de façon importante que dans le secteur aval. La comparaison des valeurs respectives de débits sur la rivière des Marsouins, mesurée par l'ORSTOM [3] au niveau de l'actuel barrage E.D.F. et à l'aval au niveau de Bethléem, conduit à un rapport moyen de 1,75 sur 19 mesures, alors que le rapport des bassins versants topographiques correspondants est proche de 3. La surface d'alimentation au niveau du barrage E.D.F. doit donc bien être supérieure à la superficie du bassin topographique.

Nous avons testé les hauteurs de pluies à la station de Takamaka. La superficie ainsi optimisée est légèrement inférieure à celle du bassin topographique. Si les valeurs d'étiage sont assez bien simulées, les pointes sont nettement sous-estimées (fig. IV.11), ce qui donne un très médiocre coefficient d'ajustement (0.67).

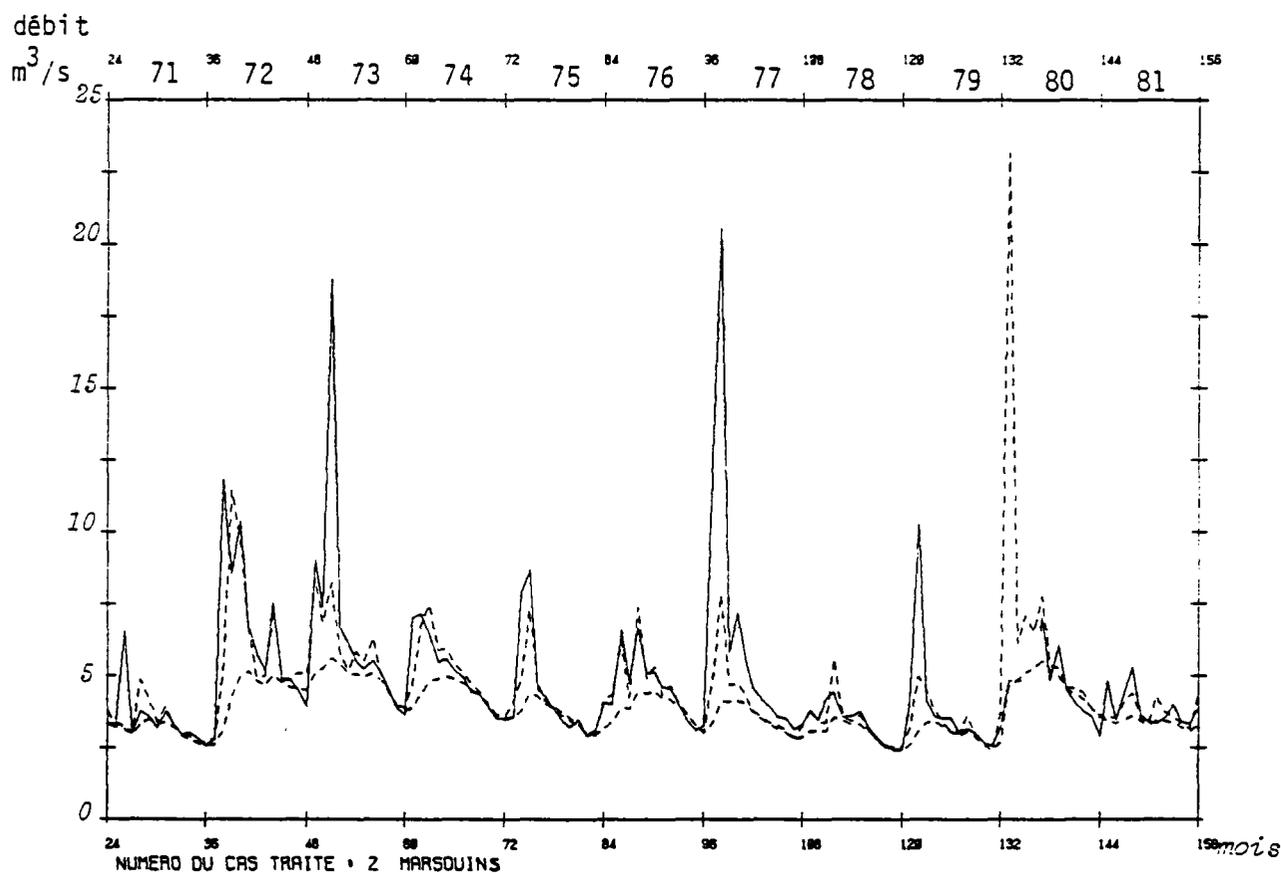


FIG. IV.11 - Simulation des débits de la rivière des Marsouins, en considérant la lame d'eau de la station de Takamaka. (à comparer à la figure VI-4)

Surface	Coeffic. ajustement	Correction Pluie	Correction E.T.P.	R. max
22.5	0.67	0	20	50

A titre indicatif, si l'on considère une relation linéaire entre la superficie d'alimentation et le débit (image très grossière) et que le débit mesuré à Bethléem est bien représentatif de tout l'écoulement de la rivière des Marsouins, le rapport entre les débits observés aux deux stations appliqués aux superficies conduirait à considérer une superficie d'alimentation de 46 km au niveau du barrage E.D.F.

Les simulations par modèle constituent un nouvel argument en faveur de ces transferts souterrains. Outre l'excès d'eau observé à la rivière des Marsouins, on met en évidence un déficit au niveau du bras Cabot.

La superficie d'alimentation calculée par modèle est inférieure aux superficies cumulées des 3 bassins versants (61 km², fig. IV.10). Elle semble cependant un peu sur-estimée surtout si l'on considère que seulement 25 % de la pluie efficace au niveau du bras Cabot participe à l'écoulement de la rivière des Marsouins et le manque de stations dans le secteur amont nous empêche de conclure définitivement. En surestimant les pluies, on réduit la superficie d'alimentation sans perte notable de qualité de l'ajustement.

Surface	Correction sur les pluies	Correction sur E.T.P.	Coefficient d'ajustement
49.9	0	0	0.98
45.6	10	14	0.98
41.2	20	20	0.97
39.7	29	20	0.97

La réalité se situe probablement dans cette fourchette de valeur.

La pondération des différentes mailles permet cependant d'intégrer les variations connues de distribution spatiale des pluies au niveau de ce secteur, et la distribution mensuelle ainsi obtenue permet une restitution régulière des débits (cf fig. IV.4).

3.1.3. Rivière des Roches et Grand Bras

La lame d'eau estimée sur le bassin de la rivière des Roches permet de bien simuler les débits de cette rivière, en respectant la surface du bassin versant topographique (cf fig. IV.5 et tableau IV.2).

Le Grand Bras, affluent de la Rivière des Roches, présente un surplus d'eau. En fixant la hauteur de pluie, on note une réduction la surface de près de 25 %. Ceci peut être lié en partie à une surélévation de la lame d'eau, mais dans des proportions réduites, car la lame d'eau considérée sur ce bassin correspond à peu près à celle de la rivière des Roches, et là encore un fort contraste pluviométrique paraît peu probable entre ces deux bassins voisins. Par contre, des possibilités de "fuites souterraines" vers la rivière des Roches, la rivière des Marsouins ou simplement la nappe alluviale à l'aval du Grand Bras sont tout à fait possibles, et ce chiffre ne paraît pas aberrant, surtout que les coulées de la dernière phase d'activité du Piton des Neiges constituant l'essentiel de la partie aval de ce bassin sont très favorables à ce phénomène d'infiltration.

3.1.4. Bras des Lianes et Bras de Caverne

La plaine des Lianes constituant le bassin versant du bras des Lianes est une structure bien individualisée, et il paraît peu probable d'envisager une aire d'alimentation supérieure à celle du bassin topographique. Ceci nous a conduit à utiliser un coefficient correcteur sur les pluies de 50 %.

Effectivement, la lacune de postes pluviométriques sur les hauts de ce secteur est manifeste sur ce bassin (fig. IV.9). La technique d'interpolation utilisée (cf chap. II) a conduit dans ce secteur à accorder une importance prépondérante aux stations les plus proches dans le cirque de Salazie. Les stations de Takamaka, guère plus éloignées, n'ont pas été prises en compte (le rapport des modules moyens de pluviométrie entre ces stations dans Salazie et celles de Takamaka est de 1 à 2 ; il se retrouve entre les mailles 180 et 199 (fig. IV.9) pourtant voisines).

Il est tout à fait logique que la lame d'eau moyenne annuelle sur ce bassin soit intermédiaire entre ces différentes valeurs, et se rapproche des valeurs corrigées par le modèle (4500 à 5000 mm).

Le même phénomène se produit sur le Bras de Caverne, et si la meilleure simulation obtenue tient compte d'une petite sur-évaluation des pluies (5 %) et de la surface (+ 13 %), il semble plus logique que tout l'écart soit imputable à une mauvaise évaluation de la lame d'eau.

Vu sa position géographique et le contexte géologique, une alimentation souterraine externe semble peu probable. Au contraire, les célèbres cascades du Voile de la Mariée apparaissant dans le rempart de Salazie en contrebas du plateau de Belouve sont probablement alimentées par des eaux s'infiltrant sur le bassin versant du Bras de Caverne. La station de Bélouve, malheureusement trop incomplète sur la période 1971-1981, n'a pas été considérée pour l'étude des pluies (chap. II) ; la comparaison des moyennes interannuelles de cette station et de celle d'Hellbourg et Mare à Poule d'eau (qui ont fortement influencé les valeurs retenues sur ce bassin) indique une pluviométrie plus élevée en moyenne de 15 % à Bélouve qu'en contrebas dans le cirque de Salazie. De plus, l'Est du bassin au pied du Mazerin est sans doute plus arrosé que le secteur Ouest où est implantée la station de Bélouve.

3.1.5. Rivière du Mât et Bras de Cilaos

Les débits de la rivière du Mât ne sont pas très bien simulés (coefficient : 0.92) : le calage ne repose que sur 22 valeurs, et seule la pointe de février 1979 a été enregistrée (les autres valeurs sont relativement uniformes). Les lames d'eau paraissent sous-évaluées, le modèle se satisfait mieux d'une correction de la pluie de + 15 à + 20 %. Là encore, les stations ayant influencé les lames d'eau considérées sont à des altitudes moyennes de 700 à 1400 m. La pluviométrie sur le pourtour du cirque risque effectivement d'être plus élevée, le manque de station ne permet cependant pas de conclure.

Si l'évaluation des lames d'eau semble correcte à Cilaos pour simuler les débits observés, le faible nombre de ces valeurs et leur relative uniformité (pas de pointes) ne garantit pas la fiabilité de cette simulation.

3.1.6. Ravine à Marquet

Le poste pluviométrique de Grand Coin, au centre du bassin, a été jugé représentatif de lame d'eau moyenne. Etant donné les gradients pluviométriques, c'est plutôt une valeur approchée par défaut, cependant la simulation réalisée avec cette valeur conduit à ne considérer qu'environ 50 % de la superficie du bassin versant.

La moitié de la pluie efficace échappe au contrôle de la ravine et s'infiltré profondément. Ces valeurs paraissent possibles, compte-tenu de la perméabilité relative des formations affleurantes (formations remaniées et phase terminale du Piton des Neiges), les sources Blanche et Denise, en contrebas de ce secteur, dans les remparts de la rivière des Galets, ont un débit d'étiage cumulé supérieur à 50 l/s. La nappe de la plaine des Galets à l'aval de ce bassin recevrait un débit souterrain latéral d'environ 900 l/s (cf chap. I.1).

3.2. Evapotranspiration potentielle

Les E.T.P. évaluées à partir des valeurs aux différentes mailles de chaque bassin n'ont en général nécessité que de petites corrections de 0 à ± 10 %. Les plus fortes corrections (20 %) s'appliquent aux bassins les moins bien simulés : rivière Langevin et Bras de Cilaos. Mais sur ces bassins, si on limite à plus ou moins 10 % l'incertitude sur l'E.T.P., la dégradation de la simulation est peu sensible.

Il en est de même sur la rivière des Marsouins pourtant bien simulée. A pluviométrie égale, le fait de considérer 21 % de correction sur l'E.T.P. au lieu de 0 % se répercute sur les autres paramètres du modèle pour donner une simulation en fait, tout à fait équivalente.

Tant que superficie et lames d'eau ne sont pas déterminées précisément et que l'on s'autorise quelques variations sur les différents paramètres, la variation du facteur correctif sur l'E.T.P., dans la plage ± 20 %, n'a guère d'influence sur l'ajustement.

Ces résultats ne remettent pas en cause notre méthode d'approche de l'E.T.P., mais ils ne permettent pas non plus de réduire l'incertitude sur ce facteur.

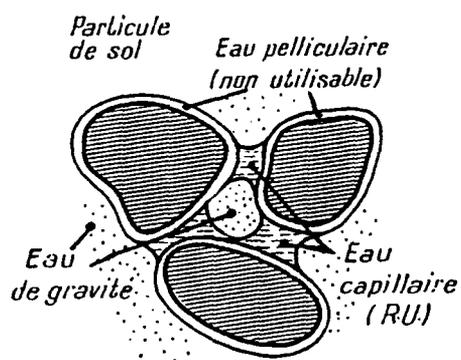
4. EVALUATION DE LA CAPACITE DE LA RESERVE DISPONIBLE POUR L'EVAPOTRANSPIRATION

4.1. Terminologie agronomique

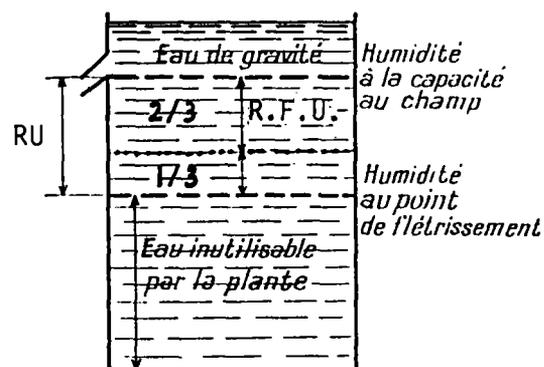
Dans l'optique d'optimiser les irrigations -apporter aux plantes la stricte quantité d'eau nécessaire à leur développement-, les agronomes se sont intéressés au sol, en tant que réservoir d'eau, et au stock d'eau ainsi disponible pour les plantes ; ils ont ainsi été amenés à définir différents termes (fig IV.12) :

- la *capacité de rétention (CR)* ou *capacité au champ (CC)* est la teneur en eau du sol qui reste, après alimentation (pluie, irrigation...), lorsque l'écoulement gravitaire devient négligeable ;
- le *point de flétrissement permanent (PF)* correspond à un seuil au delà duquel les racines ne peuvent plus extraire l'eau du sol ;
- la *réserve utile en eau du sol (RU)* ("utile pour les plantes") est donc fonction de la différence entre ces deux valeurs et de la profondeur atteinte par les racines ou "*profondeur utile*" (*Z*), d'où l'équation :

$$RU = (CR - PF) * Da * Z$$
 qui fait intervenir la *densité apparente (Da)* du sol qui permet de convertir les valeurs pondérales (CR et PF sont exprimées en pourcent de terre sèche) en valeurs volumiques ;
- pour tenir compte de la difficulté croissante qu'ont les plantes à capter l'eau à mesure que la réserve du sol s'assèche, la notion de *réserve facilement utilisable (RFU)* a été établie ; le plus souvent on considère une proportion (2/3) de la réserve utile.



figuration des réserves d'eau dans le sol



Le sol, réservoir d'eau pour les plantes

FIG. IV.12

Les mesures des taux d'humidité peuvent s'effectuer au laboratoire (méthode gravimétrique) ou sur sol en place (sonde à neutrons). Certains auteurs ont tenté de rattacher les taux d'humidité caractéristiques (CR et PF) à des valeurs du *potentiel capillaire* (quantité d'énergie liée au phénomène de succion ou de tension superficiel, que l'on fait intervenir par son logarithme décimal : pf). Si le flétrissement coïncide assez bien à $pf = 4,2$, la valeur $pf = 2,8$ pour la capacité de rétention demeure très discutée.

La texture des sols joue dans ces phénomènes un rôle très important et sur certains types de sol (exemple : alluvions du Val de Loire étudiées par l'I.N.R.A.), il a été établi des relations entre capacité de rétention en réserve utile et la teneur en argile et humus : valeurs de réserve utile allant de 0,7 mm d'eau/cm de sol pour les sables à 2 pour les limons argileux.

Ces différentes mesures restent très ponctuelles, elles ne sont représentatives que de la parcelle étudiée, voire de l'échantillon prélevé.

Il est apparu, par ailleurs, sur des sites connus (Arrou dans le Loir-et-Cher) des consommations en eau très supérieures à la normale suite à la sécheresse exceptionnelle de l'été 1976. La quantité d'eau mobilisée est apparue supérieure à la réserve utile ; les phénomènes de remontée capillaires permettant d'intéresser des couches profondes du sol ou de la roche mère, et les volumes d'eau correspondants ne sont pas facilement quantifiables.

Le type de végétal et sa profondeur correspondante d'enracinement, la pente du sol qui favorise le ruissellement sont aussi des facteurs difficiles à prendre en compte pour l'évaluation quantitative de la réserve en eau du sol.

4.2. La réserve globale en eau des sols au niveau des bassins versants

Devant les difficultés à déterminer la "réserve utile", le faible nombre de mesures s'y rapportant et le problème d'extrapoler des mesures ponctuelles à l'ensemble d'un bassin, l'hydrologue fixe a priori un ordre de grandeur global de la réserve en eau du sol sur son périmètre d'étude ;

or, cette réserve intervient au niveau de la fonction de production du modèle étudié (cf fig. IV.1). L'étude réalisée nous permet-elle de préciser la capacité de cette réserve ?

D'après les valeurs présentées au tableau IV.2, la capacité de la réserve globale varie selon les bassins de 0 à 210 mm, avec 8 valeurs comprises entre 40 et 130 mm.

Nous nous gardons bien cependant d'en déduire une variabilité spatiale de ce paramètre :

- les bassins où la réserve a été estimée nulle selon la simulation présentée ont également donné des valeurs respectives de 183 à 50 mm sur d'autres simulations sans dégradation manifeste du coefficient d'ajustement (de 0.99 à 0.98 et de 0.92 à 0.9),
- nous avons effectué une petite étude de sensibilité sur la rivière des Marsouins qui possède la chronique la plus étendue, à lame d'eau et ETP fixée, les valeurs de réserve allant de 42 à 300 mm n'ont eu aucune influence sur la qualité de l'ajustement:

Réserve en mm	Correction P et ETP	Coefficient d'ajustement pondéré	Coefficient d'ajustement pondéré naturel
42	0	0.9517	0.9786
100	0	0.9508	0.9780
300	0	0.9507	0.9782

Une telle étude serait beaucoup plus significative dans une zone de pluviométrie plus faible, car sur la plaine des Marsouins, les mois les plus "secs" sont suffisamment pluvieux pour que la réserve du sol n'ait pas à suppléer un éventuel déficit en eau.

5. CONCLUSION

Les lames d'eau estimées à partir des moyennes pondérées des valeurs aux différentes mailles permettent de réaliser de bonnes simulations des débits sur les différents bassins testés. La seule exception notable concerne le Bras des Lianes. La méthode d'interpolation utilisée -impliquant un nombre minimum de stations à considérer dans un rayon minimal de recherche- a été choisie pour représenter l'ensemble de l'île (cf chap. II). Cette méthode mérite d'être affinée pour des études ponctuelles, surtout à proximité des pôles de pluviométrie maximum (variation de 4 m des modules moyens interannuels sur une dizaine de kilomètres). Il est aussi intéressant au plan local de considérer les stations qui, trop incomplètes, ont été délaissées lors de l'étude générale. Un renforcement du réseau de postes pluviométriques s'avère cependant indispensable, si l'on veut réduire l'incertitude d'interpolation.

Il convient également de noter que les lames d'eau mensuelles ainsi évaluées permettent de bien simuler les variations mensuelles de débit, les résultats obtenus sont nettement supérieurs à ceux découlant de l'utilisation d'un seul poste pluviométrique pour les bassins de moyenne étendue (rivières des Marsouins et Langevin), ce qui confirme l'intérêt de la méthode de calcul de la lame d'eau.

La plupart des bassins étudiés étant dans des zones à forte pluviométrie (module moyen interannuel supérieur à 3 m), la légère imprécision sur les hauteurs d'eau ou la superficie réelle d'alimentation du bassin ne permet pas de resserrer la plage d'incertitude autour des valeurs d'E.T.P. Nous n'avons non plus aucun élément pour les remettre en cause.

Au niveau de la ravine à Marquet (bassin le moins arrosé de ceux étudiés), le calage du modèle conduit à optimiser à 5 % la sur-évaluation des données d'E.T.P. Même si cet exemple ne peut nous permettre de conclure sur l'ensemble de la côte sous le vent, ponctuellement l'estimation de l'E.T.P. réalisée semble correcte.

Pour les mêmes raisons, il ne nous a pas été possible de définir précisément la capacité de la réserve disponible pour l'évapotranspiration. Seules des phases répétées d'assèchement et de recharge de cette réserve permettraient de l'optimiser avec précision, ce n'est pas le cas sur les bassins étudiés.

Au plan de la vérification des données climatiques, les études réalisées sont surtout concluantes en ce qui concerne l'évaluation des lames d'eau.

Nous avons pu, en outre, apprécier la qualité des simulations réalisées. Sans entrer dans l'étude des différents écoulements que nous étudierons ultérieurement, nous avons apporté un argument supplémentaire à l'existence d'un transfert souterrain à partir des bassins du Bras Cabot et du Bras Patience vers la rivière des Marsouins : nous mettons simultanément en évidence un apport extérieur au bassin versant topographique de la rivière des Marsouins pour expliquer les débits de cette rivière et des pertes au niveau du Bras Cabot. Le paléo-réseau hydrographique de cette rivière, drainant l'ancien cirque des Marsouins partiellement comblé par les coulées terminales du Piton des Neiges, doit toujours fonctionner et soutenir le réseau actuel.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BILLARD (1974). - Carte géologique de La Réunion à 1/50 000e (4 feuilles + Notice).
- [2] DUTHIL J. (1970). - Eléments d'écologie et d'agronomie - Tome :
Connaissance du milieu.- J.B. Baillière et fils Editeurs, 383 p.
- [3] LE GOURRIERES .- Hydrologie superficielle de La Réunion. 5 volumes ORSTOM.
- [4] ROCHE P.A., THIERY D. (1983) .- Modélisation en hydrologie - Note
d'introduction .- B.R.G.M. Orléans, Recyclage d'Hydrologie, 12-15
septembre 1983
- [5] SALY C., ROCHE P.A., THIERY D. (1983) .- Le modèle CREANEIGE - Descrip-
tion et mode d'emploi .- B.R.G.M. Orléans, Recyclage d'Hydrologie,
12-15 septembre 1983 - Note provisoire.
- [6] THIERY D. (1980) .- Simulation de bassins hydrologiques par modèles
globaux - Programme AMANDE, description et mode d'emploi .- B.R.G.M.
Orléans, rapport 80 SGN 192 HYD
- [7] THIERY D. (1983) .- Description du modèle CREACHIM .- B.R.G.M. Orléans,
SGN/EAU Note technique n° 83/15, 53 p.

ANNEXES

ANNEXE IV.1

Le Modèle GARDENIA*

Le département EAU du B.R.G.M. dispose déjà depuis un certain nombre d'années des modèles globaux de simulation PLUIE-DEBIT ou PLUIE-NIVEAU. Ces modèles globaux représentent le cycle de l'eau depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire ou au niveau aquifère en un point. Ces modèles sont globaux, car ils considèrent une "entrée" globale (une "lame d'eau" sur le bassin et une évapotranspiration potentielle) et une "sortie" unique (qui est suivant le cas le débit à l'exutoire ou le niveau piézométrique en un point). Ces modèles simulent le cycle de l'eau par un système de 3 à 4 réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les premiers centimètres du sol dans lesquels se produit l'évapotranspiration,
- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide,
- une ou deux zones aquifères qui produisent l'écoulement souterrain.

1. FONCTIONS DE PRODUCTION ET DE TRANSFERT

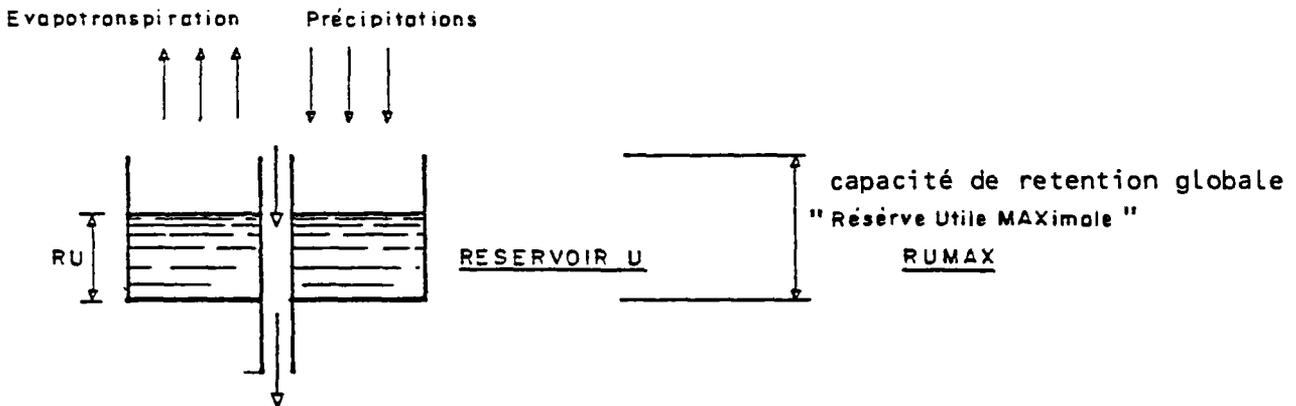
Ce modèle réalise un bilan entre les apports et les consommations pour chacun des pas de calcul. Ce calcul est effectué par deux fonctions :

- la fonction Production détermine quelle quantité d'eau sera apportée au modèle et quelle quantité sera évaporée (eau), consommée ou s'infiltrera dans les horizons inférieurs pour ressortir "plus tard" ;
- la fonction Transfert détermine à quel moment l'eau ressortira à l'exutoire du bassin ou arrivera à la nappe ; le transfert s'effectue par passage à travers les 2 ou 3 réservoirs inférieurs du modèle.

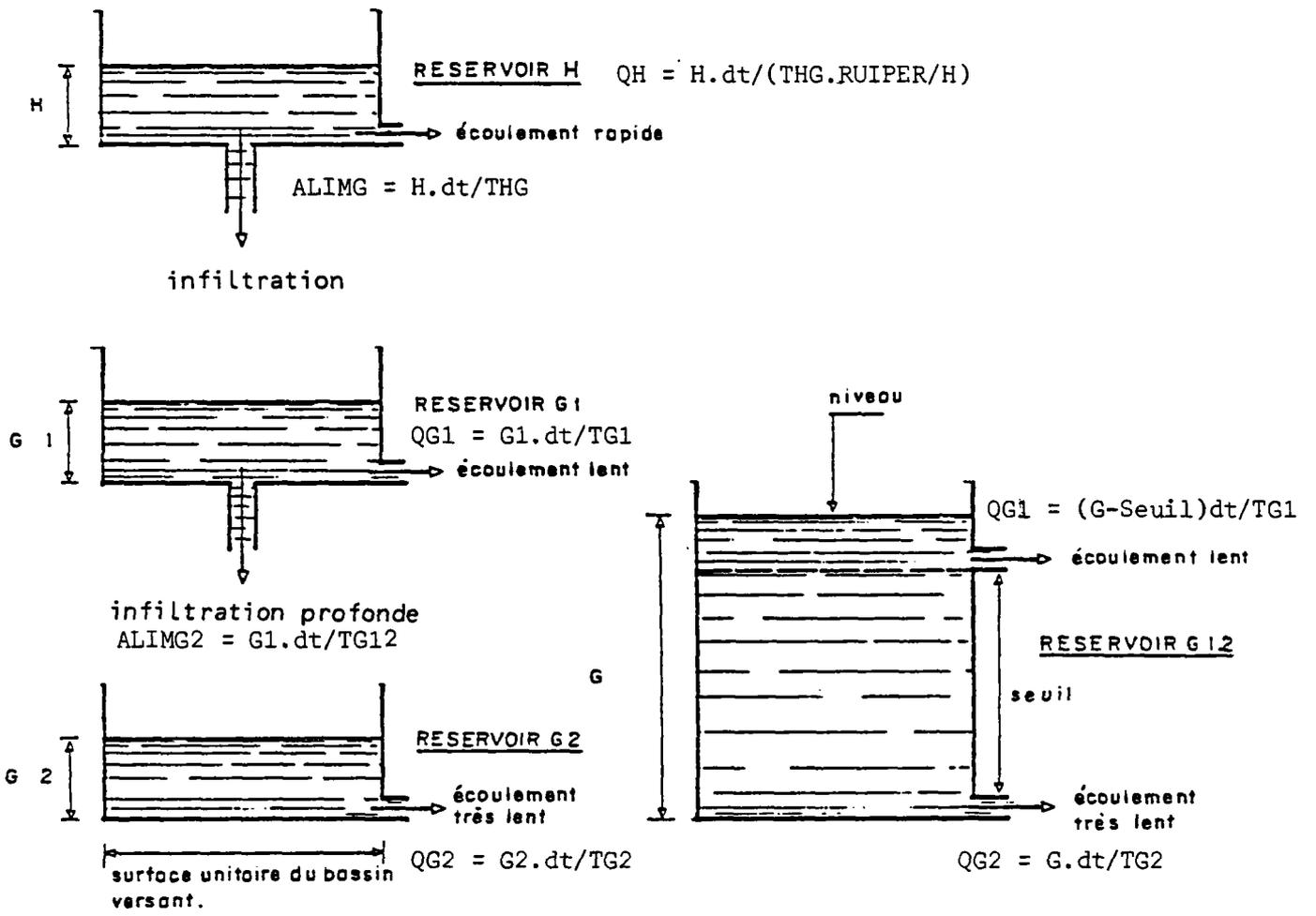
* GARDENIA : Modèle Global A Réservoirs pour la simulation des Niveaux et des Débits
(d'après "Description du Modèle CREACHIM" - D. THIERY [7])

Le Modèle GARDENIA du B.R.G.M.

- Fonction de production



- Fonction de transfert



au choix

Option 2 réservoirs souterrains

Option 1 réservoir souterrain à 2 orifices de vidange

Le réservoir intermédiaire H

Le réservoir intermédiaire H est alimenté en eau .
par la réserve superficielle ; il est vidangé par deux exutoires :

- par percolation dans le réservoir souterrain G1 suivant une loi linéaire (vidange exponentielle) de constante de temps THG :

$$ALIMG = H . dt / THG$$

(dt étant le pas de temps) ;

- par écoulement à l'extérieur sous forme de "débit retardé" QH suivant une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER qui est en fait la hauteur de H pour laquelle la percolation ALIMG et l'écoulement QH sont égaux :

$$QH = H . dt / (THG.RUIPER/H)$$

Cet écoulement non linéaire est prépondérant quant à l'état de remplissage H est élevé ; la percolation est plus importante quand l'état de remplissage H est plus bas (le rapport QH/ALIMG est égal à H/RUIPER).

Le réservoir souterrain G1

Le réservoir souterrain G1 est alimenté en eau par le réservoir intermédiaire H. Il est vidangé par deux exutoires dans le cas le plus général :

- par percolation dans le réservoir souterrain lent G2, suivant une vidange exponentielle de constante de temps TG12 :

$$ALIMG2 = G1 . dt / TG12$$

Cette percolation peut être supprimée dans les cas simples où il n'est pas nécessaire de faire intervenir deux composantes souterraines.

- par écoulement vers l'extérieur sous forme de débit souterrain QG1, suivant une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG1 :

$$QG1 = G1 . dt / TG1$$

Le réservoir souterrain lent G2

Ce réservoir, quand il existe, est alimenté en eau par le réservoir souterrain G1 ; il est vidangé uniquement sous forme de débit souterrain lent QG2. Un tel débit souterrain est parfois nécessaire pour représenter une composante très lente dans un écoulement :

$$QG2 = G2 \cdot dt / TG2$$

On peut sur option considérer que ce débit QG2 s'infiltré vers des horizons plus profonds et ne ressort pas à l'exutoire.

Réservoir souterrain unique G

Il est parfois plus avantageux d'utiliser un seul réservoir G à deux exutoires séparés par un seuil. Un tel réservoir simule par exemple la mise en service d'un deuxième griffon (orifice) quant le niveau d'eau dépasse la valeur d'un seuil. Il peut également simuler une cote de débordement ou bien simplement représenter le fait qu'une courbe de tarissement descend plus rapidement au début (quand les deux exutoires débitent simultanément) qu'à la fin quand seul l'exutoire le plus profond est en service. Cette configuration est particulièrement intéressante pour la simulation des niveaux aquifères.

Un tel réservoir, qui remplace dont le réservoir G1 et l'éventuel réservoir G2, produit donc suivant le cas, un ou deux débits par lequel il se vidange :

$$\left\{ \begin{array}{l} QG2 = G \cdot dt / TG2 \\ QG1 = (G - SEUIL) \cdot dt / TG1, \end{array} \right.$$

si G est supérieur au SEUIL.

2. CALAGE DU MODELE

Le modèle est caractérisé par un certain nombre de paramètres qui ne peuvent pas être définis a priori. Les valeurs optimales de ces paramètres sont alors déterminées à partir de valeurs initiales par processus itératif par recherche de la meilleure corrélation entre observations et valeurs de sortie calculées par le modèle.

La méthode d'optimisation est fondée sur une adaptation de l'algorithme non linéaire de ROSEMBROCK. Le but de la méthode est de minimiser une fonction critère F, en faisant varier successivement p paramètres.

Pour le modèle GARDENIA dans lequel on cherche à optimiser l'adéquation entre débits (ou charges) simulés et observés, la fonction critère retenue est une caractéristique de l'écart entre les débits (ou charges) calculés et observés, liés par la relation : $Y = AX + B + \epsilon$.

* Pour un calcul de débit :

ϵ = écart de simulation

X = somme des vidanges des réservoirs du modèle en mm/mois

Y = débit mesuré à l'exutoire en m³/s

A = surface du bassin versant en kilomètre carré (divisé par 86,4 x 30)

B = débit extérieurs constant (généralement 0) en m³/s

* Pour un calcul de niveau piézométrique :

X = niveau en mm dans le réservoir souterrain

Y = niveau piézométrique mesuré en mètres au dessus d'un niveau de référence

A = inverse du coefficient d'emménagement (divisé par 1000).

B = niveau de base local en mètres.

NOTA. A est l'inverse du coefficient de corrélation (divisé par 1000) uniquement si le point d'observation est situé loin d'une limite à potentiel imposé (cours d'eau), sinon A sera plus petit (le coefficient d'emménagement apparent qui en serait déduit serait alors trop élevé).

A et B peuvent être imposés ou calculés par le modèle. La fonction F1 à minimiser est :

$$F1 = - \sqrt{1 - \frac{(Y - AX - B)^2}{VAR Y}}$$

On voit immédiatement que si A et B sont calculés par le modèle, F1 est l'opposé du coefficient de corrélation R entre la série observée Y et la série calculée AX + B (on prend l'opposé du coefficient de corrélation car pour maximiser R, on minimise F1 = -R). Quand Y et X sont affinis, R est égal à +1. Si A et B sont imposés, F1 est l'opposé d'un coefficient "d'ajustement" et n'atteint sa valeur minimale que quand Y et AX + B sont égaux (et non plus affinis).

La méthode d'optimisation est itérative. Pour déterminer rapidement le jeu optimal de paramètres, il est conseillé :

- d'attribuer à chaque paramètre une valeur initiale aussi réaliste que possible,
- de fixer un nombre d'itérations MAXIT suffisant (environ 70).

Assez rapidement, la valeur du critère d'optimisation F1 ne diminue pratiquement plus. La solution optimale est atteinte lorsque chaque paramètre a atteint une valeur stable.

Il serait possible d'optimiser tous les paramètres à la fois, mais ce n'est pas forcément souhaitable. En effet, il est souhaitable que l'utilisateur contrôle le réalisme et la validité des paramètres obtenus. La convergence est d'autant plus lente, qu'il y a plus de paramètres à optimiser : cela conduit donc à des temps de calcul très longs, alors qu'une optimisation fixant temporairement une partie des paramètres à des valeurs réalistes permet d'améliorer rapidement la qualité des ajustements. Les paramètres qui étaient fixés peuvent alors être libérés pour terminer le calage.

En pratique, le nombre de paramètres à optimiser simultanément ne devrait pas dépasser 8 ou 10.

L'optimisation des paramètres est réalisée par le sous-programme de calcul ROSACE du B.R.G.M. qui est une version améliorée de la méthode d'optimisation non linéaire de ROSEMBROCK. Cette méthode procède par tâtonnements successifs en évoluant plus rapidement dans les directions qui produisent les améliorations les plus significatives du calage. Le calage s'effectue par une suite d'optimisations de ce type, l'utilisateur restant seul juge de la qualité de la décomposition de l'écoulement qui a été trouvée par le modèle pour optimiser un critère qui reste toujours une évaluation très globale de la "qualité" d'une simulation.

Une option permet de privilégier plus ou moins les faibles valeurs de débits par une pondération effectuée au moment du calcul du critère d'ajustement.

Pour chaque paramètre, on peut préciser une valeur minimale et une valeur maximale. Lors des calculs d'optimisation les paramètres resteront toujours compris entre ces deux valeurs, ce qui permet d'éviter un calage avec des valeurs peu réalistes. On évite ainsi que les premiers calculs d'optimisation "se perdent" vers des valeurs peu réalistes qu'ils auront du mal à quitter ensuite.

SITUATION GEOGRAPHIQUE DES STATIONS EQUIPEES DE LIMNIGRAPHS
ET CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS CORRESPONDANTS

Cours d'eau	Station	Coordonnées géographiques		Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Indice de compacité	Indice de pente de Roche	Indice global de pente (m/km)	Pente moyenne (m/km)	Altitude minimale (m)	Altitude maximale (m)
		Longitude	Latitude								
Rivière du Mat	Ilet Morin	55° 34' 22" E	20° 59' 35" S	88,4	40.2	1.21	0.338	138	199	300	3 068
Bras de Caverne	Ilet Caverne	55° 34' 05" E	21° 00' 22" S	15.8	20.2	1.43	0.406	147	203	410	2 090
Bras des Lianes	Bellevue	55° 37' 09" E	20° 59' 45" S	17.7	20.2	1.35	0.456	176	225	300	2 090
Riv. des Roches	Abondance	55° 39' 56" E	21° 01' 23" S	23.8	25.0	1.45	0.475	170	188	155	2 090
Grand Bras	Vieux Pont	55° 39' 19" E	21° 02' 07" S	7.1	14.0	1.48	0.454	197	215	254.3	1 550
Riv. des Marsouins	Barrage	55° 37' 03" E	21° 04' 55" S	25.8	26.9	1.50	0.376	114	177	700	3 069
	Ilet Bannane	55° 36' 01" E	21° 05' 10" S	27.5					150	515	3 069
Bras Cabot	Prise EDF	55° 36' 24" E	21° 05' 23" S	16.5	23.9	1.66	0.363	109	157	652.45	2 300
Riv. Langevin	Grand Galet	55° 38' 52" E	21° 17' 57" S	26.2	26.3	1.45	0.443	191	216	435	2 440
	Passerelle	55° 39' 06" E	21° 19' 44" S	36.0						245	2 440
Riv. de l'Est	Les Orgues	55° 43' E	21° 10' S	27.0	21.0	1.13	0.354	163		840	2 427
	Les Mares	55° 44' E	21° 10' S	31.2	23.2	1.16	0.469	167		700	2 100
Bras de Cilaos	Pavillon	55° 27' 40" E	27° 10' 42" S	68.7	33.	1.11				350	3 068
Rav. à Marquet	Dos d'Ane	55° 23' 7" E	20° 58' S	2.33	6.	1.10				998	1 510

5me PARTIE

EVALUATION GLOBALE DE LA RESSOURCE EN EAU A LA REUNION
BILAN D'EAU AU NIVEAU DU SOL CALCULE A PAS DE TEMPS MENSUEL
SUR LA PERIODE 1971-1981 EN CHAQUE MAILLE DE L'ILE

Les modèles globaux de simulation hydrologique nous ont permis de vérifier, au niveau des bassins jaugés, que les données climatiques mensuelles, notamment les hauteurs de pluie, en chaque maille, sont correctement évaluées.

Par contre, nous n'avons pu obtenir une définition rigoureuse de la capacité globale de la réserve en eau du sol disponible pour l'évapotranspiration. Sur la plupart des bassins étudiés à pluviosité élevée, cette réserve ne participe que très peu au bilan d'eau.

S'il est peu probable qu'une coulée subaffleurente dépourvue de végétation ait la même capacité de réserve en eau qu'un sol profond développé sur alluvions, nous ne sommes pas en mesure de quantifier ces différences .

Nous préférons donner une valeur uniforme à cette capacité de réserve, en accord avec les valeurs couramment admises et celles obtenues sur les différents bassins simulés. Nous étudierons la répartition spatiale et temporelle de la pluie efficace obtenue par le bilan effectué en chaque maille à pas de temps mensuel entre la pluie, l'ETP et la réserve en eau du sol (annexe V.1). L'étude fréquentielle de ces valeurs permettra de mettre en évidence les zones critiques où cet apport efficace est très limité.

Il conviendra cependant d'étudier l'influence que peut avoir la réserve en eau du sol sur le bilan, en fonction de la capacité maximum qu'on lui fixe et de faire ressortir les zones éventuelles où cette réserve joue un rôle important où elle mériterait une définition très précise.

Nous étudierons également dans quelle mesure une imprécision sur les valeurs d'E.T.P. et le pas de temps de l'étude interviennent dans l'approche de la pluie efficace.

Enfin, nous regarderons s'il n'est pas possible, au moins localement ou sur de petites unités, de proposer des approches simplifiées pour le calcul des apports efficaces.

1. PLUIE EFFICACE OBTENUE EN CONSIDERANT UNE CAPACITE MAXIMALE DE RESERVE EN EAU DU SOL DE 100 MM UNIFORMEMENT SUR L'ENSEMBLE DE L'ILE

1.1. Distributions spatiale et temporelle des moyennes interannuelles

1.1.1. Distribution spatiale

Les écarts régionaux sur l'E.T.P. sont relativement négligeables devant ceux des hauteurs de pluie. Sur les moyennes interannuelles notamment, l'E.T.P. varie géographiquement de 500 à 1400 mm. Les hauteurs de précipitation de 1 à 10 m, ceci explique la grande similitude entre la représentation des hauteurs de pluies efficaces (fig. V.1) et celle des hauteurs de pluie (fig. II.15).

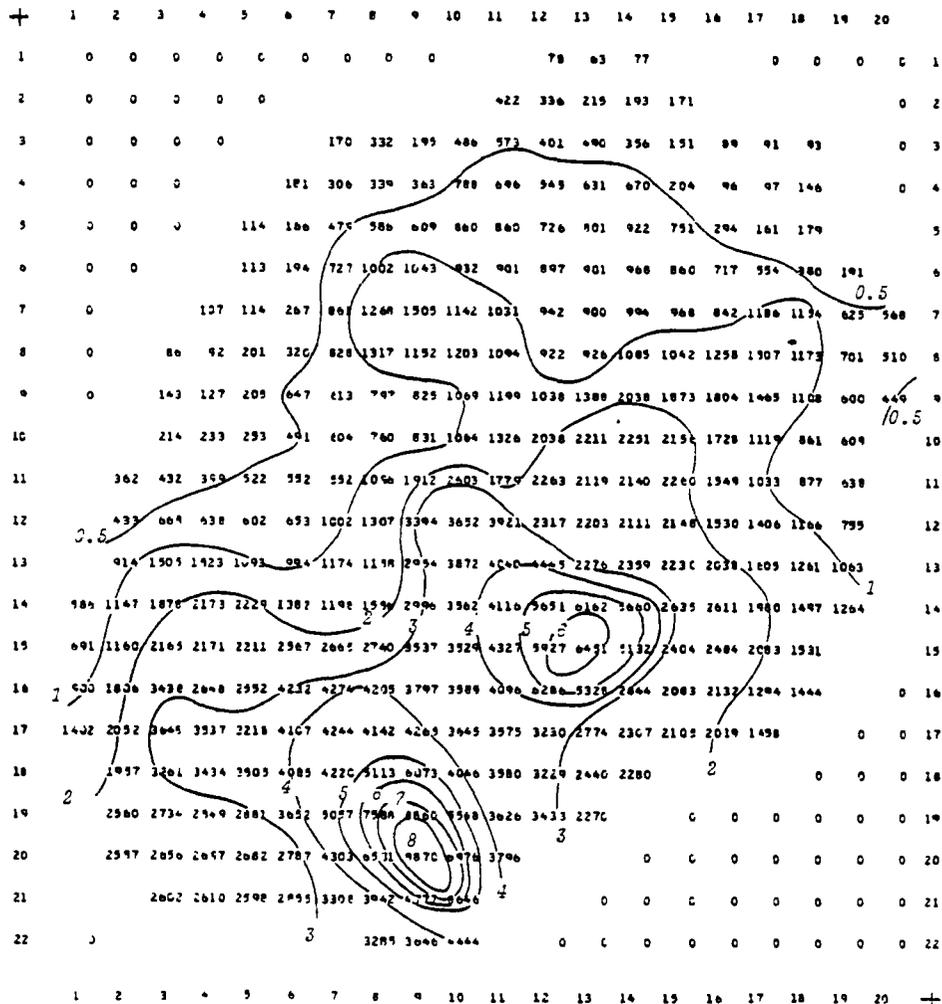
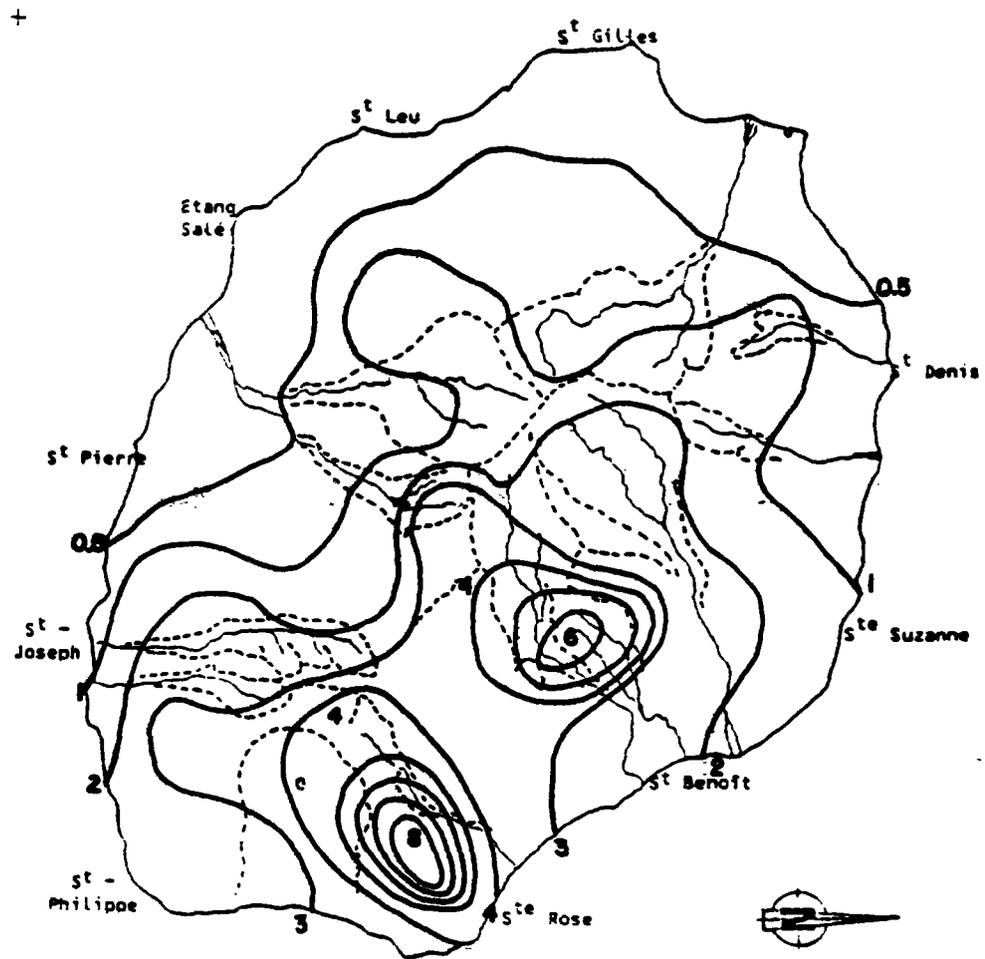


FIG. V.1 - Pluie efficace moyenne annuelle sur la période 1971-1981 - Valeurs aux 304 mailles



1. PLUIE EFFICACE OBTENUE EN CONSIDERANT UNE CAPACITE MAXIMALE DE RESERVE EN EAU DU SOL DE 100 MM UNIFORMEMENT SUR L'ENSEMBLE DE L'ILE

1.1. Distributions spatiale et temporelle des moyennes interannuelles

1.1.1. Distribution spatiale

Les écarts régionaux sur l'E.T.P. sont relativement négligeables devant ceux des hauteurs de pluie. Sur les moyennes interannuelles notamment, l'E.T.P. varie géographiquement de 500 à 1400 mm. Les hauteurs de précipitation de 1 à 10 m, ceci explique la grande similitude entre la représentation des hauteurs de pluies efficaces (fig. V.1) et celle des hauteurs de pluie (fig. II.15).

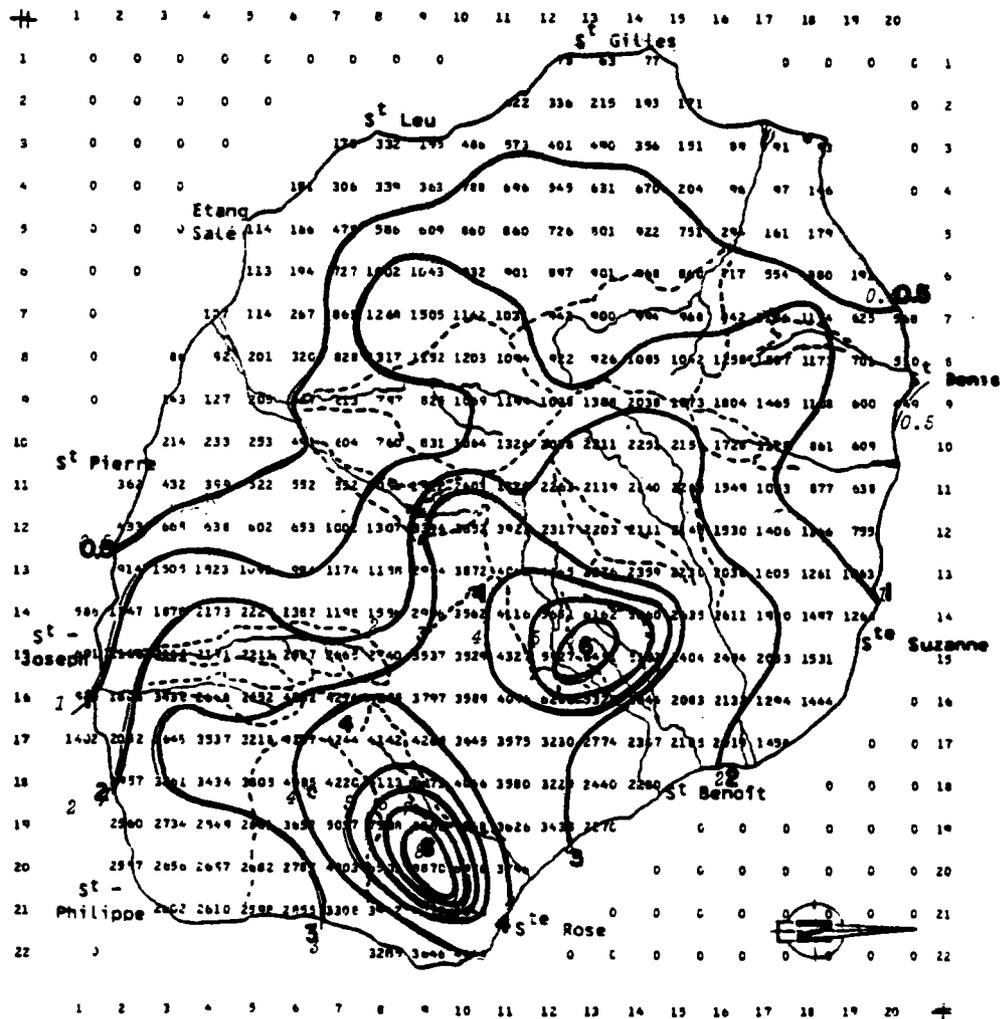


FIG. V.1 - Pluie efficace moyenne annuelle sur la période 1971-1981 - Valeurs aux 304 mailles

Les pôles de précipitation efficace maximum se retrouvent au niveau de Takamaka et de la rivière de l'Est, l'isohyète 2 m isole tout le secteur "au vent" de Bras-Panon à St-Philippe.

A l'opposé, une large bande littorale du secteur sous le vent de La Possession au Nord à St-Pierre au Sud reçoit moins de 500 mm de pluie efficace, la zone du Port - St-Gilles ne reçoit même pas 100 mm.

Parallèlement, on note une correspondance entre l'E.T.P. et l'E.T.R. dans les secteurs où la hauteur de pluie efficace dépasse 2 m (apports par les pluies régulièrement supérieures à la demande de l'E.T.P.) et une divergence qui s'accroît progressivement en allant vers le littoral Ouest (fig. V.2) où, en hiver notamment les pluies ne peuvent satisfaire la demande exprimée par l'E.T.P. Vers St-Gilles, l'E.T.R. ne dépasse guère 600 mm alors que l'E.T.P. est estimée à plus de 1300 mm.

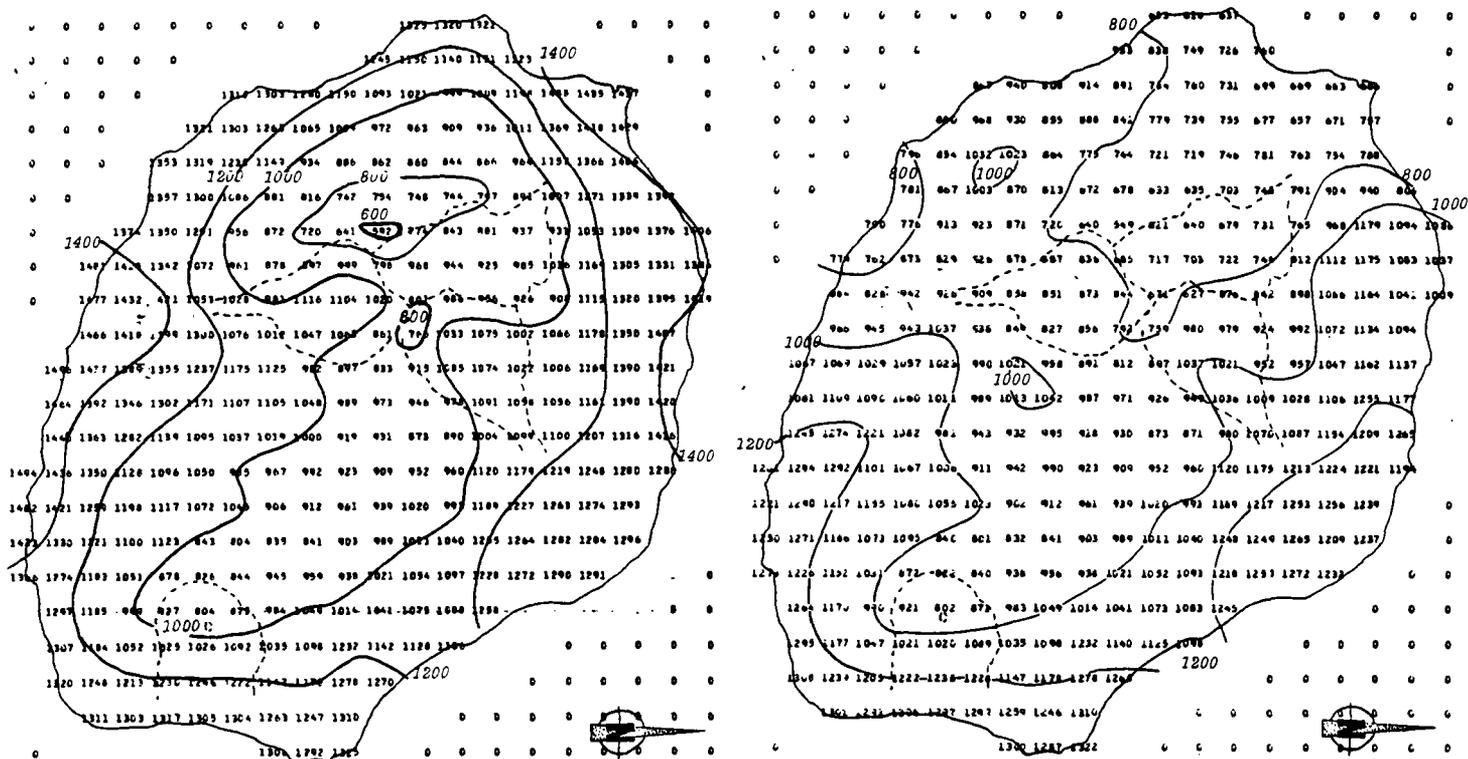


FIG. V.2 - Valeurs de l'E.T.P. (a) et de l'E.T.R. (b) en mm
Moyenne annuelle de la période 1971-1981

1.1.2. Répartition mensuelle des valeurs moyennes de l'E.T.R.
et de la pluie efficace

Nous venons de voir que dans l'espace l'écart entre E.T.P. et E.T.R. intervient surtout sur le littoral sous le vent. Dans le temps, cet écart se manifeste surtout sur le deuxième semestre avec un maximum en octobre-novembre (fig. V.3).

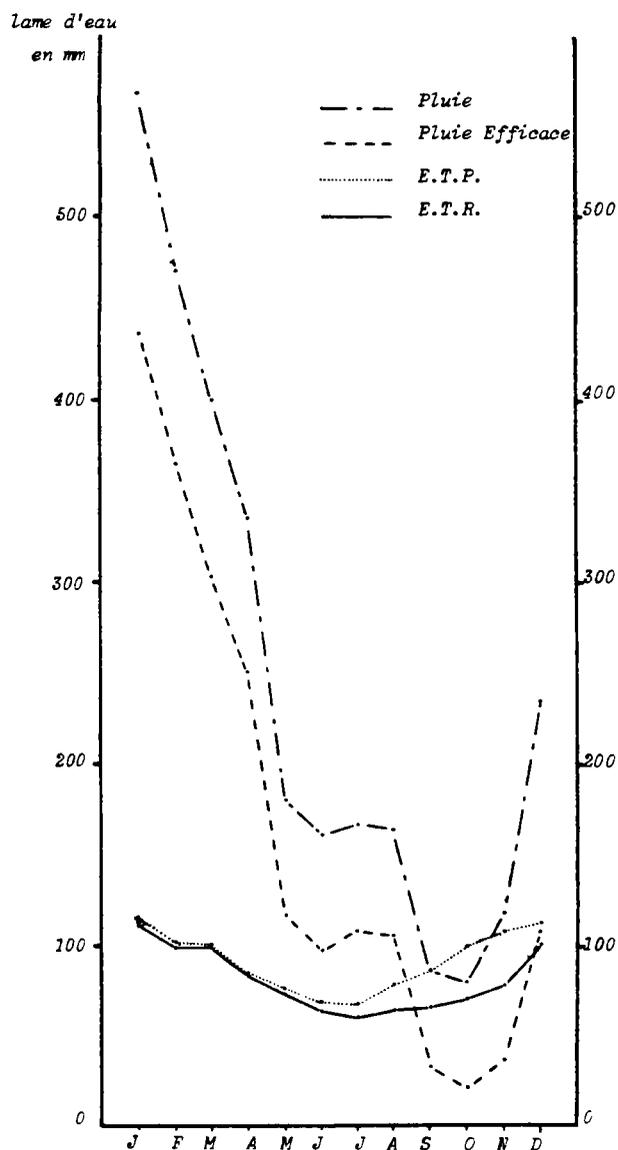


FIG. V.3 - Distribution mensuelle des valeurs moyennes sur l'ensemble de l'île sur la période 1971-1981, de la pluie (P), la pluie efficace (Peff), l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR)

A mesure que la réserve en eau du sol s'assèche, elle ne peut plus satisfaire la demande exercée par l'ETP, supérieure à l'apport par les pluies pendant la saison sèche et l'écart entre ETP et ETR augmente avec l'avancement de cette saison.

La distribution de l'ETR présente ainsi deux saisons inégales :

- de décembre à mars ETR > 100 mm ; 110 mm en janvier
- d'avril à novembre ETR < 80 mm ; 60 mm en juillet

Ces variations d'ETR sont cependant assez faibles au cours de l'année (amplitude de 50 mm), surtout en regard de la distribution mensuelle des pluies (amplitude de 500 mm). Ces deux distributions sont également relativement synchrones (maximum pendant l'été austral et minimum en hiver pour les deux variables).

Il est donc encore logique que la pluie efficace présente une distribution mensuelle analogue à celle des précipitations (fig. V.3). Les principaux écarts ($P - P_{eff}$) apparaissent aux mois de janvier et décembre, lors de la recharge de la réserve en eau du sol (l'excédent de pluie par rapport à la demande (ETP) est en premier lieu utilisé par le sol qui se resature, l'écoulement n'apparaît que lorsque la capacité du sol est saturée).

Le mois de décembre présente alors une hauteur moyenne de pluie efficace comparable à celle des 4 mois de début de saison sèche de mai à août. Ces cinq mois présentant entre 100 et 120 mm de pluie efficace moyenne assurent la transition entre les mois pluvieux du début d'année de janvier (440 mm) à avril (250 mm de pluie efficace) et les mois secs d'octobre à novembre qui n'atteignent pas 40 mm de pluie efficace.

La représentation des hauteurs de pluie efficace moyennes établies pour chaque mois confirme la variabilité spatiale de ces valeurs. En septembre (fig. V.4), plus de la moitié de l'île ne reçoit pas de pluie efficace ou très peu ; sur la côte sous le vent, seul le secteur de la plaine des Makes reçoit plus de 10 mm de précipitation efficace ; à l'opposé, les hauts de la rivière de l'Est, pôle de pluviométrie maximum, en reçoivent plus de 400 mm.

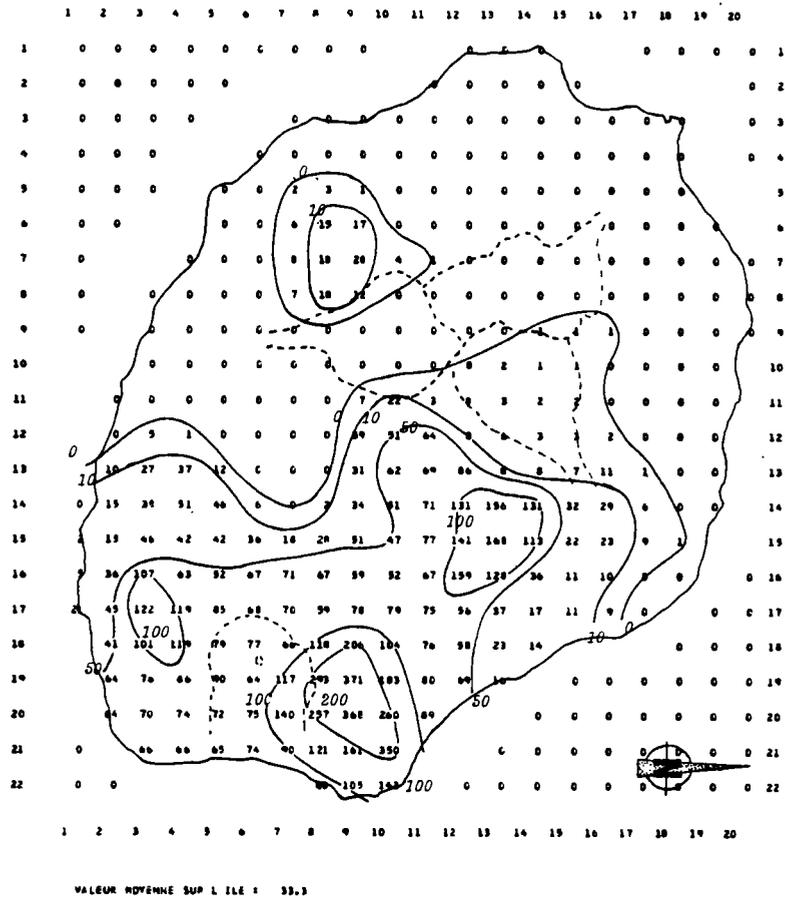


FIG. V.4 - Pluie efficace moyenne mensuelle de septembre, en mm, sur l'île de La Réunion

1.1.3. Etudes ponctuelles du bilan

L'étude des valeurs moyennes de pluie efficace, tant dans l'espace que dans le temps, met en évidence les variations saisonnières globales et la répartition géographique contrastée des apports efficaces.

Afin de mieux définir ces écarts régionaux, nous avons suivi particulièrement les résultats de 19 mailles régulièrement réparties sur l'ensemble de l'île de La Réunion (fig. V.5).

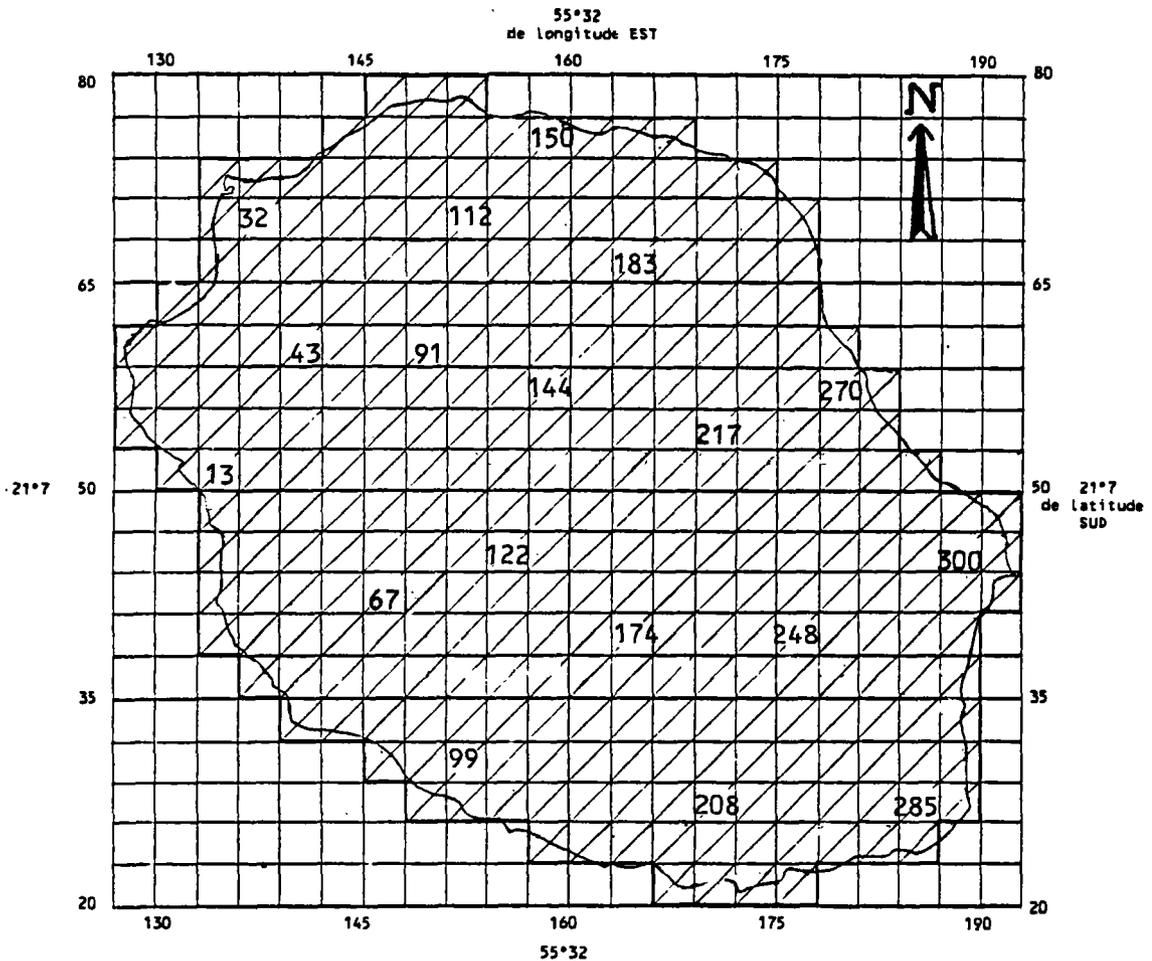


FIG. V.5 - Localisation des 19 mailles retenues pour l'étude du bilan détaillée

Le contraste régional sur les hauteurs de pluie efficace apparaît très flagrant sur le tableau V.1 résumant les bilans ainsi effectués en chaque maille retenue.

La région du Port (maille 32) n'a connu des précipitations efficaces que 7 mois sur les 132 de la période 1971-1981 (moyenne interannuelle de 97 mm) ; à l'opposé, les zones à fortes pluviométries (mailles 216 et 300) n'ont eu respectivement que 6 et 4 mois sans pluie efficace (moyenne interannuelle de l'ordre de 5 m).

Les mois de septembre, octobre et novembre apparaissent sur l'ensemble de l'île comme ceux de moins fréquente et de plus faible hauteur de pluie efficace ; ce phénomène noté sur la distribution des valeurs moyennes (fig. V.3) est général sur toute l'île : sur toute la côte sous le vent à l'exception de la Plaine des Makes, mais aussi sur le littoral

TABLEAU V.1 - Bilan mensuel de l'eau au niveau du sol pour 19 mailles de l'île de La Réunion
Méthode de Thornthwaite - Période 1971-1981 - Réserve utile : 100 mm

N° maille	Localité ou secteur	Nombre de fois où la pluie efficace est nulle												Etat de la réserve fin décembre			Valeurs moyennes interannuelles						
		Total	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	(a)	(b)	(c)	ETP	ETR	ETRETR	P	Peff	P-ETR
13	Colimaçon	26	2	1	2	4	9	10	11	11	11	11	11	3	8	2	1	1280	808	472	998	195	190
32	Le Port	126	8	9	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	0	2	9	1418	671	747	763	97	92
43	Petite France	73	0	0	1	2	5	9	11	10	11	11	10	3	8	3	0	866	746	120	1672	922	936
51	Dos d'Ane	88	3	1	3	3	7	9	11	10	11	11	11	8	3	6	2	1007	791	216	1513	717	722
67	Pl. des Makes	35	0	0	1	0	2	1	0	7	8	9	5	2	9	2	0	872	871	1	2144	1268	1273
91	Aurère	90	2	1	3	4	8	9	11	10	11	11	11	9	4	3	4	925	722	203	1806	1085	1084
99	St-Louis	120	9	8	9	7	10	11	11	11	11	11	11	11	0	2	9	1432	828	604	951	127	123
112	Hauts de St-Denis	57	0	0	1	1	5	6	4	9	11	11	8	1	10	1	0	1115	1066	49	2536	1465	1470
122	Palmitte Rouge	98	5	3	5	5	10	9	10	9	11	11	11	9	2	33	6	1047	827	220	1654	831	827
144	Hellbourg	53	0	0	1	0	4	6	2	5	9	11	10	5	7	33	1	1085	1037	48	3160	2119	2123
150	Gillot	89	5	4	1	3	6	9	10	10	11	11	11	8	3	53	5	1421	1137	284	1780	638	643
174	Pl. des Cafres	76	2	1	3	2	6	6	8	7	11	11	11	8	3	55	3	1037	943	94	2112	1174	1109
183	Pl. des Fougères	35	0	1	0	0	3	3	0	3	6	9	6	5	6	35	0	1100	1087	93	3129	2038	2042
208	Pl. des Grognés	33	4	0	2	0	2	0	0	2	6	5	7	6	5	03	3	1259	1217	42	3386	2165	2169
217	Takamaka	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	2	0	11	0	0	1020	1020	0	6952	5927	5932
248	Bellecombe	15	0	0	0	0	1	0	0	0	2	4	6	2	9	2	0	844	840	4	5089	4244	4249
270	St-Benoît	21	0	1	0	0	1	0	0	3	4	5	6	1	11	0	0	1088	1088	0	3528	2440	2440
285	St-Philippe	16	1	0	0	0	1	0	0	0	2	5	5	2	9	2	0	1248	1239	9	3900	2656	2661
300	Hauts de Ste-Rose	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	11	0	0	1247	1246	1	6028	4797	4782
	Maximum possible	132	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11									

(a) saturée - (b) partiellement saturée - (c) asséchée

Nord vers St-Denis et même dans Salazie, le mois d'octobre n'a jamais connu de pluie efficace sur la période 1971-1981 ; sur les régions littorales de St-Benoît et St-Philippe, ce mois ne connaît de pluie efficace qu'une année sur deux.

Les mois de janvier à avril sont au contraire majoritairement des mois où la pluie efficace n'est pas nulle. Seules les régions du Port et St-Louis échappent à cette règle.

Le mois de décembre assure une grande partie de la recharge en eau du sol, il est logique que la réserve soit ainsi partiellement au moins resaturée en fin d'année. C'est le cas pour la majeure partie de l'île. On note cependant que cette réserve n'est pas du tout rechargée une année sur deux sur le littoral nord et dans le cirque de Cilaos ; elle est totalement asséchée 9 années sur 11 sur le littoral Ouest vers le Port et St-Louis. Dans le cirque de Mafate et sur la plaine des Cafres (région centrale de l'île), on observe une proportion équivalente de recharge complète, recharge partielle et recharge nulle en fin d'année. Cette recharge est toujours totalement assurée par contre dans les régions très pluvieuses de Takamaka et Rivière de l'Est.

Les mêmes secteurs apparaissent lors de l'étude de l'écart moyen interannuel entre ETP et ETR, l'ETR représente moins de 50 % de l'ETP sur le Port. Cet écart est par contre très faible à nul dans toute la région de forte pluviométrie, et sur la plaine des Makes

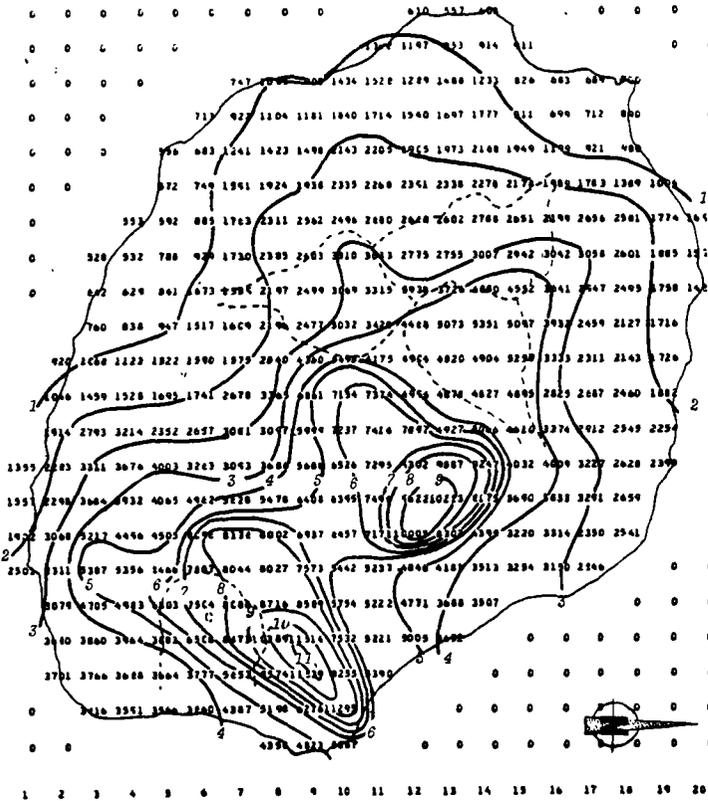
1.2. Etude fréquentielle

En chaque maille, nous effectuons un classement croissant sur les valeurs calculées des onze années pour chaque mois, pour les valeurs saisonnières (saison "sèche" de mai à novembre, saison des pluies de décembre à avril) et pour les valeurs annuelles.

Remarque. Nous nous intéressons plus particulièrement aux valeurs annuelles, aux valeurs saisonnières et aux valeurs d'un mois de chaque saison (février et septembre) correspondant aux années de rangs : 1, 2, 5, 10 et 11 (et respectivement considérées comme année décennale sèche, quinquennale sèche, médiane, quinquennale humide et décennale humide).

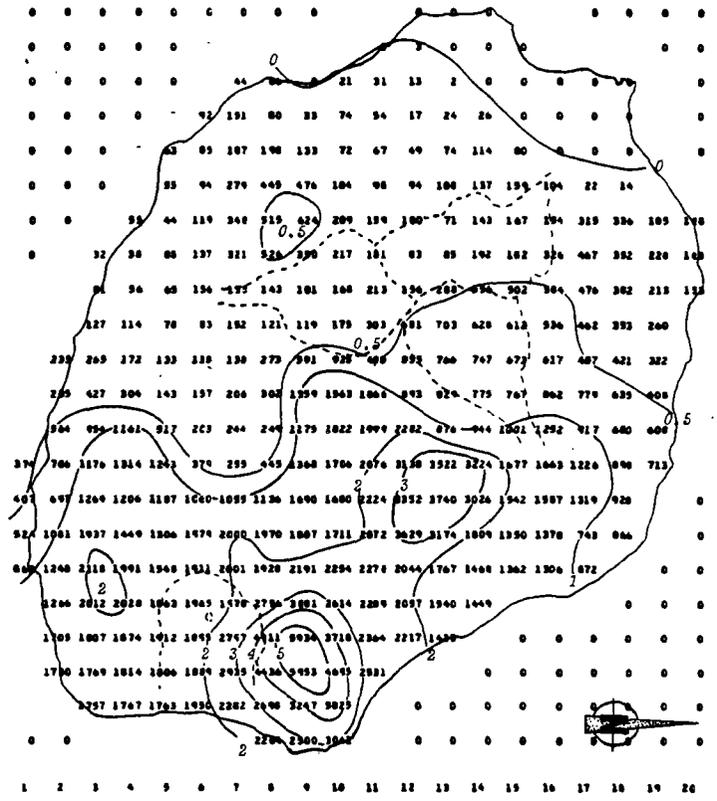
La distribution régionale mise en évidence sur les valeurs moyennes reste grossièrement valable sur toutes les séries de valeurs considérées (annexe V.1). Selon la saison ou le mois et la durée de retour, le secteur ne connaissant pas de pluie efficace se déplace progressivement du littoral sous le vent vers l'Est - Nord-Est jusqu'à isoler les pôles de pluviométrie maximum.

Si les maxima de précipitations efficaces dépassent onze mètres vers les hauts de la rivière de l'Est, ils n'excèdent guère 500 mm vers le Port St-Gilles et St-Louis (fig. V.6 A). L'essentiel de ces apports nets est assuré par la saison des pluies ; la zone du Port St-Gilles n'a jamais connu de précipitation efficace en saison sèche pendant les onze années étudiées (fig. V.6 B)



VALEUR MOYENNE SUR L'ILE : 3064.2

A - Année

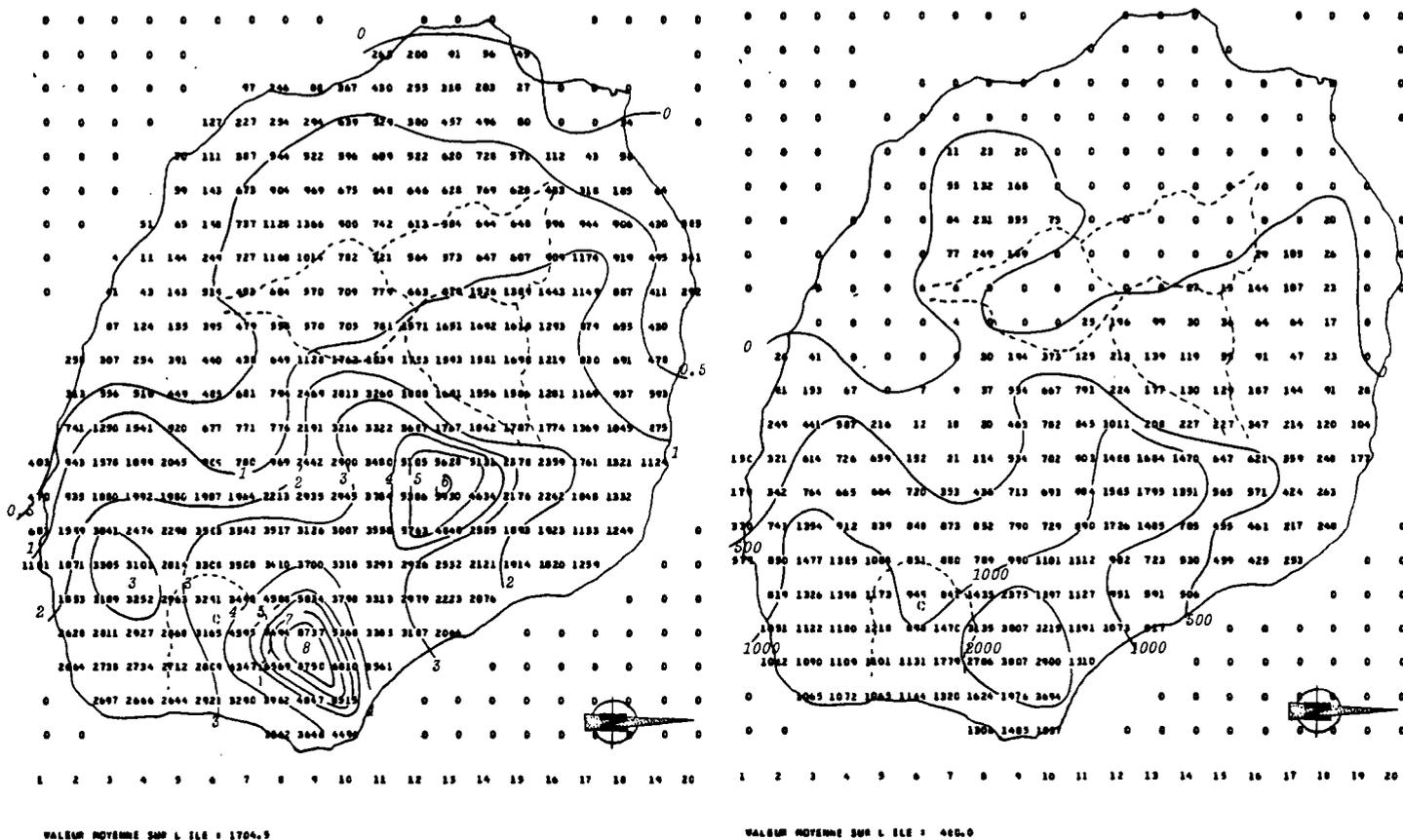


VALEUR MOYENNE SUR L'ILE : 906.3

B - Saison sèche de mai à novembre

FIG. V.6 - Pluie efficace correspondant à l'année décennale humide - Rang 11 sur la période 1971-1981

Nous nous intéressons surtout aux zones de faibles précipitations efficaces. Il apparait ainsi qu'une année sur deux (fig. V.7 A), la zone du Port St-Gilles n'a pas eu de pluie efficace, et tout le littoral Ouest de St-Denis à St-Pierre en a reçu moins de 500 mm.



A - Année

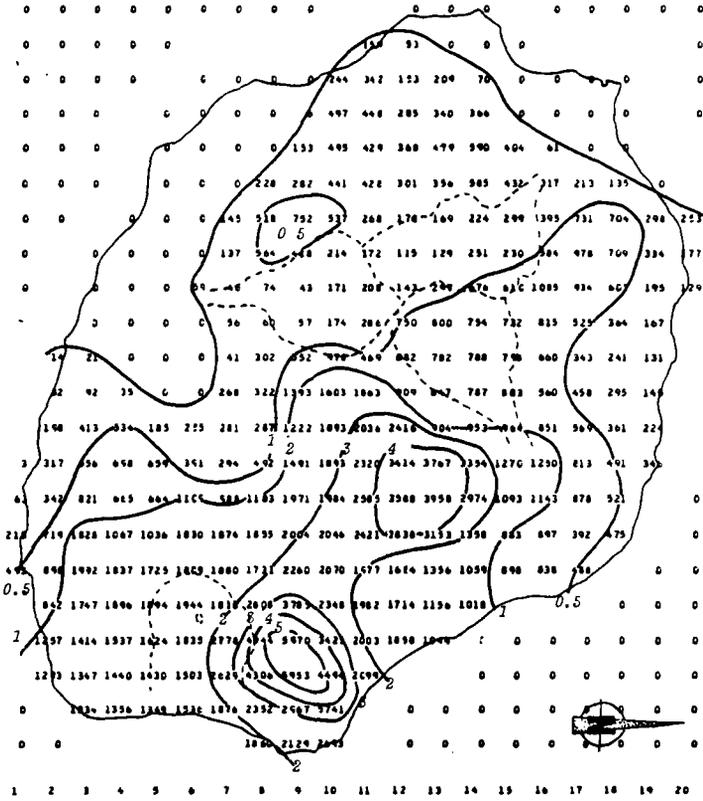
B - Saison sèche de mai à novembre

FIG. V.7 - Pluie efficace correspondant à l'année médiane (rang 5 de la période 1971-1981)

Pour l'année médiane, en saison sèche, seul sur la côte Ouest, le secteur de la Plaine des Makes reçoit des pluies efficaces, la zone sans apport gagnant même le littoral Nord vers St-Denis.

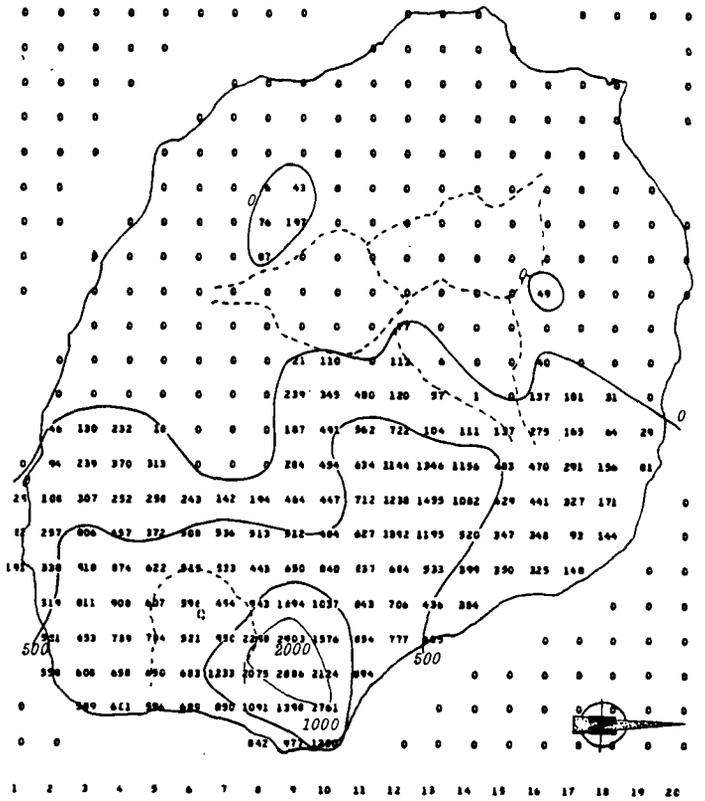
En année quinquennale sèche, la zone de St-Louis - St-Leu ne connaît pas non plus de pluie efficace et en année décennale sèche, la zone sans apports gagne la plaine des Cafres et les hauts de l'Ouest (fig. V.8 A). Seuls le Piton de la Fournaise et le secteur des Hauts de St-Benoît reçoivent plus de 1 m de pluie efficace. Durant les sept mois de mai à novembre de l'année décennale sèche (fig. V.8 B), on n'observe pas de pluie efficace sur toute la moitié Ouest de l'île de Ste-Marie au nord à Petite Ile au sud, exceptés les secteurs de Roche Ecrive et de la plaine des Makes, et l'isohyète 1 m isole le secteur des Hauts de Ste-Rose - Rivière de l'Est. Sur le mois de septembre le plus sec observé de la période 1971-1981, seules les rivières de l'Est et Langevin ont connu des pluies efficaces (fig. V.8 C).

Même sur un mois de saison humide, tel février (fig. V.8 D), la courbe des 100 mm de précipitations efficaces isolent les régions de pluviométrie maximum.



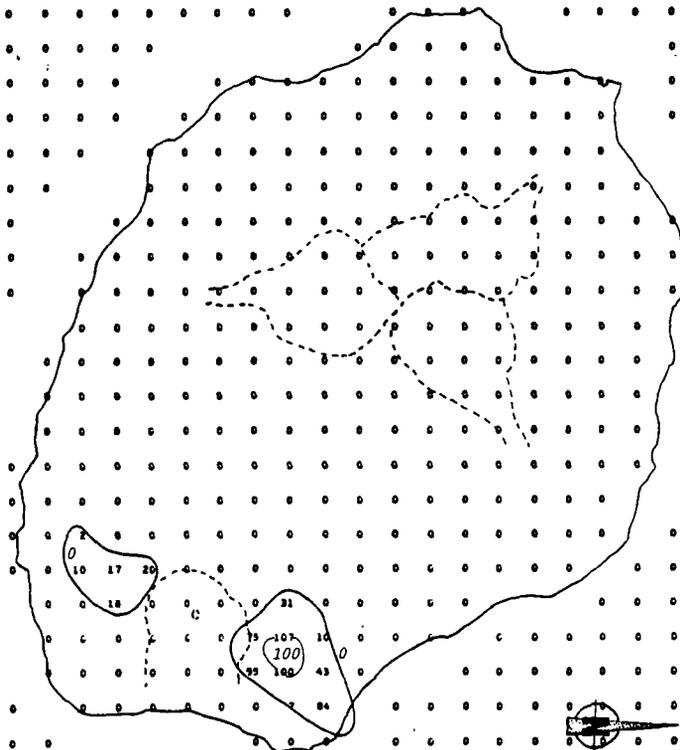
VALEUR MOYENNE SUR L'ILE : 932.2

A - Année

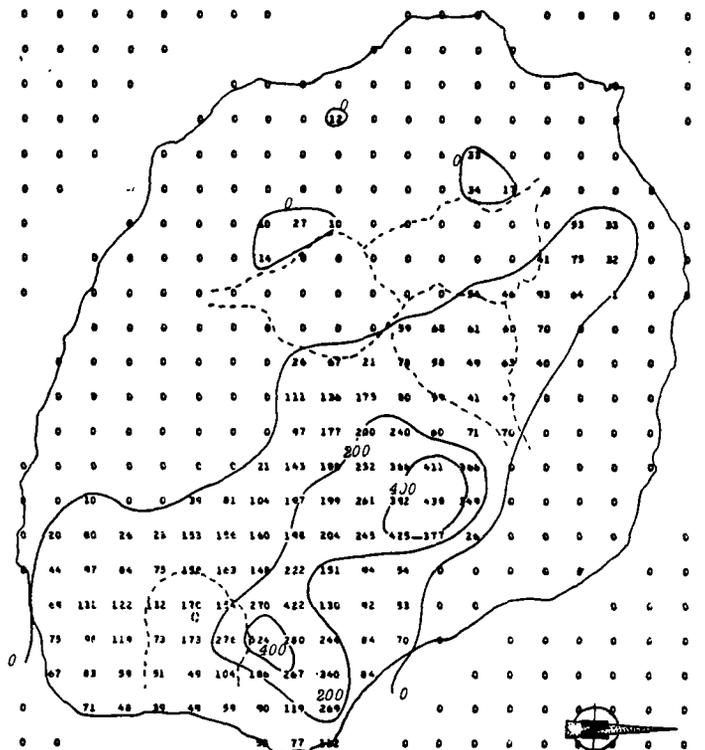


VALEUR MOYENNE SUR L'ILE : 292.8

B - Saison sèche de mai à novembre



C - Mois de septembre



D - Mois de février

FIG. V.8 - Pluie efficace correspondant à l'année décennale sèche (rang 1 sur la période 1971-1981)

2. INFLUENCE REGIONALE DE DIFFERENTS FACTEURS SUR LES VALEURS DE LA PLUIE EFFICACE

2.1. Influence des valeurs d'E.T.P.

Nous avons vu dans la troisième partie que diverses études réalisées tant à La Réunion que dans d'autres régions présentant des analogies climatiques avec cette île montrent que l'approche de l'E.T.P. par la formule de Turc à pas de temps mensuel conduit à sous-évaluer les valeurs d'E.T.P. ; cette sous-évaluation pouvant atteindre 20 %. L'application des modèles globaux de simulation hydrologique ne nous a pas permis de minimiser cette incertitude.

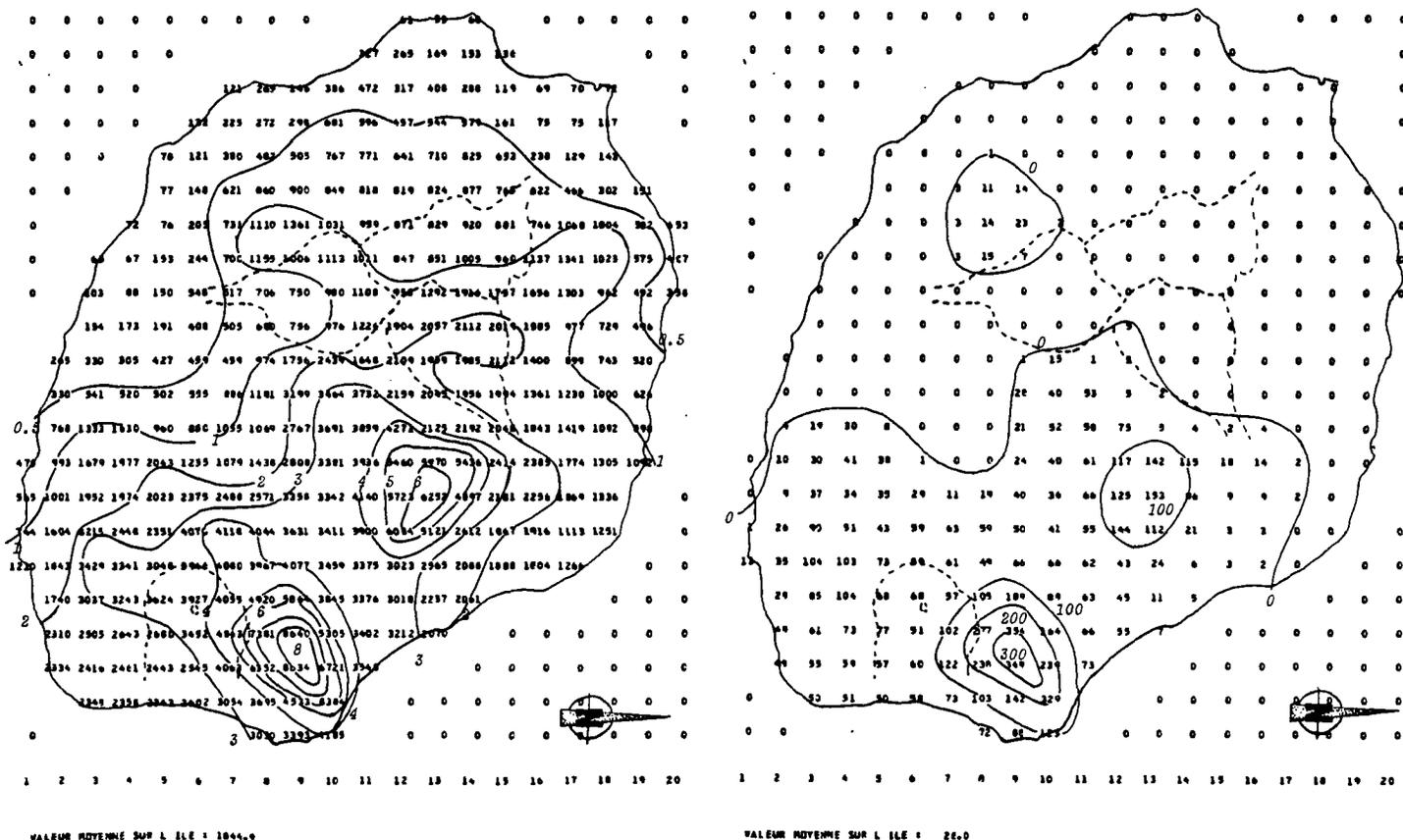
Afin d'étudier l'influence éventuelle d'une telle erreur, nous avons réappliqué mensuellement le bilan de Thornthwaite aux différentes mailles en multipliant chaque valeur mensuelle d'E.T.P. par un coefficient correcteur de 1,2.

Sur l'ensemble de l'île, l'écart consécutif à cette sur-évaluation de 20 % de l'ETP conduit sur la moyenne interannuelle au niveau de l'île à un écart de -145 mm (-7 %) sur la pluie efficace ; en moyenne mensuelle cet écart suit la distribution de la pluie efficace : maxima en janvier, minima en octobre (tableau V.2).

	P	ETP x 1.2	ETR	P eff	Ecart sur P eff
Janvier	587.7	139.1	130.9	414.2	22.4
Février	470.1	122.4	118.2	345.6	19.6
Mars	400.8	121.9	118.3	286.5	16.7
Avril	336.7	103.	99.7	234.1	16.6
Mai	179.9	92.2	86.4	108.1	9.1
Juin	160.8	83.6	75.3	89.1	9.3
Juillet	167.4	81.8	69.4	101.2	8.5
Août	164.1	94.8	72.7	98.7	8.4
Septembre	87.7	105.2	73.5	28.	5.3
Octobre	80.	120.7	76.3	16.8	4.9
Novembre	119.3	131.6	87.4	30.2	7.2
Décembre	235.4	136.1	116.2	92.4	16.1
Année	2970.9	1332.6	1124.6	1844.9	144.

TABLEAU V.2

Cet écart se manifeste peu sur la représentation des isovaleurs de pluie efficace moyenne interannuelle (fig. V.9 A). Il a d'autant plus de chance d'être important que les valeurs d'E.T.P. sont élevées donc au niveau des secteurs côtiers, mais à condition également que la pluie soit suffisante : dans les secteurs défavorisés de la côte sous le vent, l'écart n'excède guère quelques dizaines de mm (20 mm au Port et à St-Gilles) ; par contre, il excède 200 mm sur le littoral au vent.



A - Année

B - Septembre

FIG. V.9 - Pluie efficace moyenne interannuelle période 1971-1981 en considérant une ETP sur-évaluée de 20 %

Même pour un mois "sec" tel septembre (fig. V.9 B), l'écart sur les pluies efficaces moyennes interannuelles n'apparaît pas nettement. La zone sans pluie efficace n'est que très légèrement plus étendue, l'écart passe de quelques mm à l'Ouest à une vingtaine de mm à l'Est.

On s'aperçoit donc que l'incertitude sur l'E.T.P. n'affecte que légèrement les valeurs de pluie efficace. Dans les conditions d'écoulement (pluie supérieure à l'E.T.P., réserve du sol saturée), l'écart représente évidemment 20 % de l'E.T.P. Sur la côte sous le vent, ces événements sont relativement peu fréquents et ont peu d'influence au niveau d'une évaluation globale ; sur les quelques mois présentant des écoulements, les hauteurs de pluie sont généralement telles (plusieurs centaines de mm) que l'écart dû à l'E.T.P. (20 à 30 mm) est relativement peu important.

L'écart ne devient plus conséquent dans les zones de forte pluviosité, mais là encore il est de l'ordre des différentes imprécisions dues à la mesure et à l'interpolation des hauteurs de pluies.

2.2. Influence de la capacité de la réserve en eau du sol

Nous n'avons pas les éléments nous permettant de définir précisément et régionalement la capacité de la réserve en eau disponible pour l'évapotranspiration. Nous avons préféré considérer une valeur homogène de 100 mm sur l'ensemble de l'île. Il convient cependant d'étudier les répercussions qu'entraînent sur l'évaluation des hauteurs de pluies efficaces, des valeurs différentes de cette capacité globale.

En considérant successivement des valeurs homogènes de 50 mm et 150 mm pour cette capacité de réserve, nous étudierons les périodes et les secteurs où ce facteur joue un rôle notable dans le bilan d'eau au sol. Ces valeurs de 50 et 150 mm encadrent vraisemblablement la valeur réelle dans la plupart des cas.

2.2.1. Etude globale de l'ensemble de l'île

Au niveau global de l'île, le fait de considérer une réserve de capacité 50 ou 150 mm conduit à un écart de 60 mm sur les pluies efficaces moyennes interannuelles, soit environ 3 %. Cet écart devient moins négligeable déjà à l'échelle des moyennes mensuelles, car ce sont les 3

TABLEAU V.3 - Distribution mensuelle des moyennes interannuelles au niveau de l'île de La Réunion des valeurs de P et ETP, ainsi que des valeurs de Peff et ETR obtenues en considérant des réserves en eau du sol de 50 mm et 150 mm

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Septem	Octob.	Novemb	Décemb	Année	
P en mm	568.7	470.1	400.8	336.7	179.9	160.8	167.4	164.1	87.7	80.	119.3	235.4	2970.9	
ETP en mm	115.9	102.	101.5	85.9	76.8	69.7	68.2	79.	87.7	100.6	109.7	113.4	1110.5	
RU=50mm	ETR	110.9	99.2	98.2	83.6	70.9	62.6	58.5	61.	61.8	64.3	74.8	100.2	946.2
	Peff	448.	369.1	304.9	252.4	117.6	98.9	110.	107.5	33.3	21.9	40.	120.	2023.6
RU=150mm	ETR	111.2	99.7	100.1	84.9	74.9	67.	63.6	71.5	77.2	84.4	101.4	1005.2	
	Peff	425.6	360.4	301.6	248.6	117.	98.1	109.6	107.	33.3	21.7	37.3	102.8	1963.
ETR ₁₅₀ -ETR ₅₀	0.3	0.5	1.9	1.3	4	4.4	5.1	8.3	9.7	12.9	9.6	0.8	59.	
P ₅₀ -Peff ₁₅₀	22.4	8.7	3.3	3.6	0.6	0.8	0.4	0.5	0	0.2	2.7	17.2	60.6	

mois de décembre, janvier et février (avec respectivement 17.4, 22.4 et 8.7 mm d'écart sur les pluies efficaces moyennes interannuelles) qui supportent l'essentiel de ces variations (tableau V.3). Ce sont les mois assurant la recharge d'humidité du sol.

L'écart sur l'E.T.R. intervient lors de l'assèchement de la réserve en saison sèche, surtout d'août à novembre. Ce sont bien sûr les mois qui correspondent aux écarts ETP-ETR les plus importants.

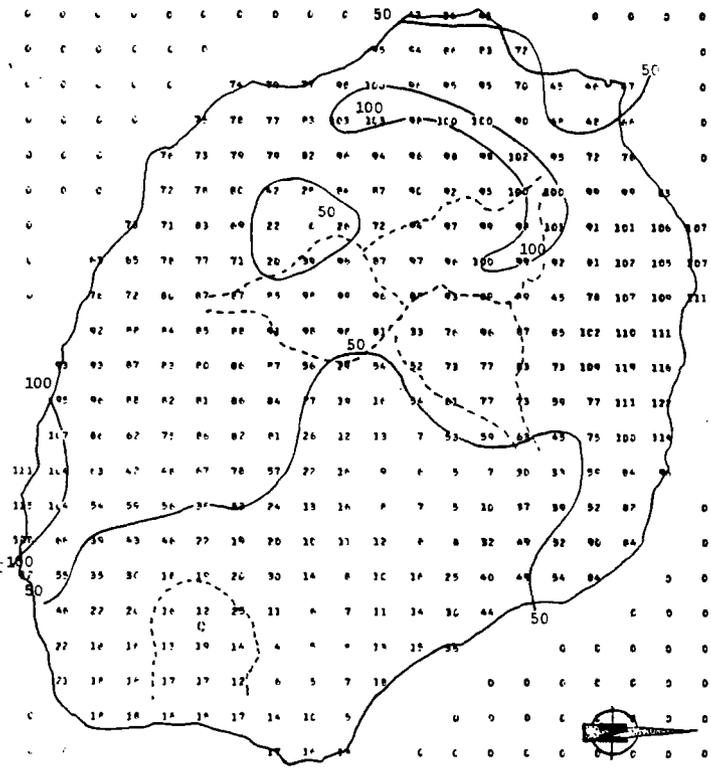
Ces écarts sur la pluie efficace sont variables au cours de l'année. Ils le sont également sur le plan spatial, ainsi qu'en témoigne la carte des écarts moyens interannuels sur les pluies efficaces obtenues en considérant des réserves de 50 et 150 mm (fig. V.10 A). Cet écart est inférieur à 30 mm sur le secteur de forte pluviométrie correspondant à Peff 2 m. Il est même inférieur à 10 mm au niveau des pôles de hauteur de pluie maximum de Takamaka et Rivière de l'Est. Les pluies sont suffisamment abondantes l'hiver pour empêcher l'assèchement de la réserve.

L'écart est également inférieur à la moyenne de l'île sur le littoral de St-Gilles et du Port, les pluies d'été sont ici trop faibles pour permettre la recharge régulière de la réserve qui ne pourra ainsi être mise à contribution lors de la saison sèche.

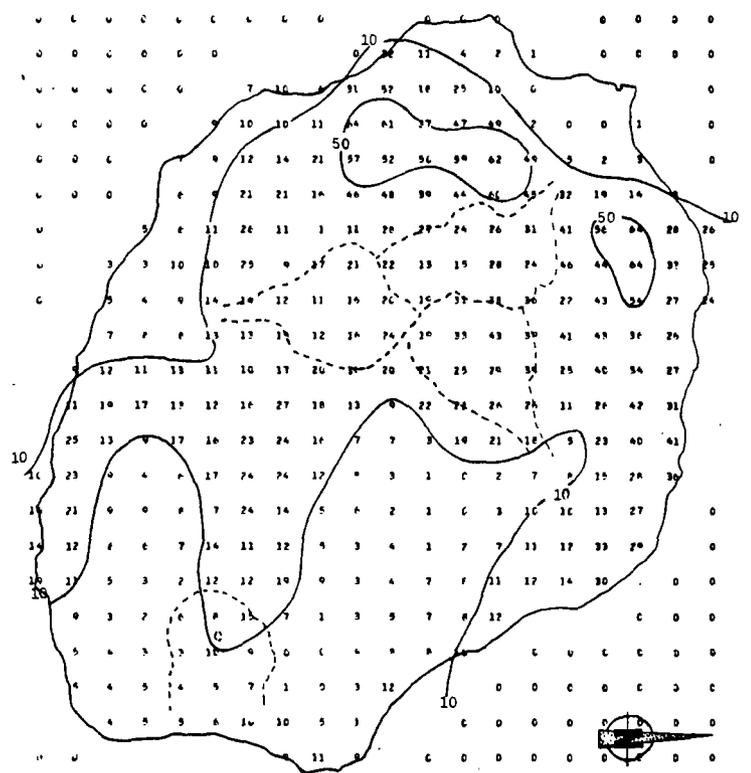
Sur le reste de l'île, l'écart varie de 60 à 100 mm, il atteint et dépasse même cette valeur de 100 mm (écart des réserves considérées) :

- sur le littoral nord de St-Denis à Ste-Suzanne,
- sur une bande d'altitude 700 à 1000 m sur les hauts de l'ouest, de Trois Bassins à Dos d'Ane,
- sur le littoral sud vers St-Joseph.

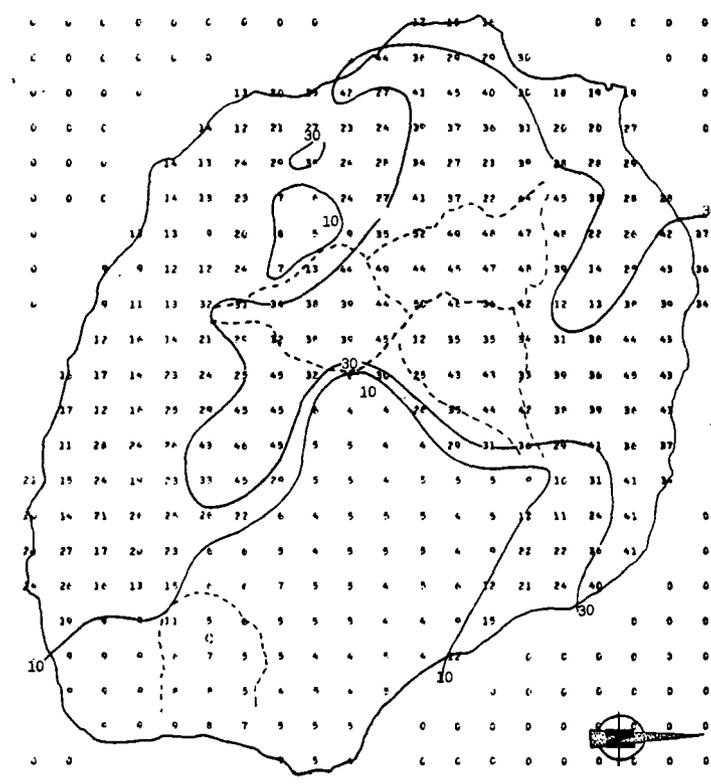
A l'échelle mensuelle (fig. V.10 B à V.10 D), cet écart dépasse 60 mm en décembre sur les Hauts de St-Denis et les Hauts de l'Ouest. En janvier, il dépasse 40 mm sur les Hauts de l'Ouest et dans les cirques. En février, il intéresse surtout les régions littorales nord-ouest et sud de l'île, ainsi que Cilaos, mais ne touche pas les Hauts de l'Ouest dont la réserve serait donc en général reconstituée dès le mois de janvier.



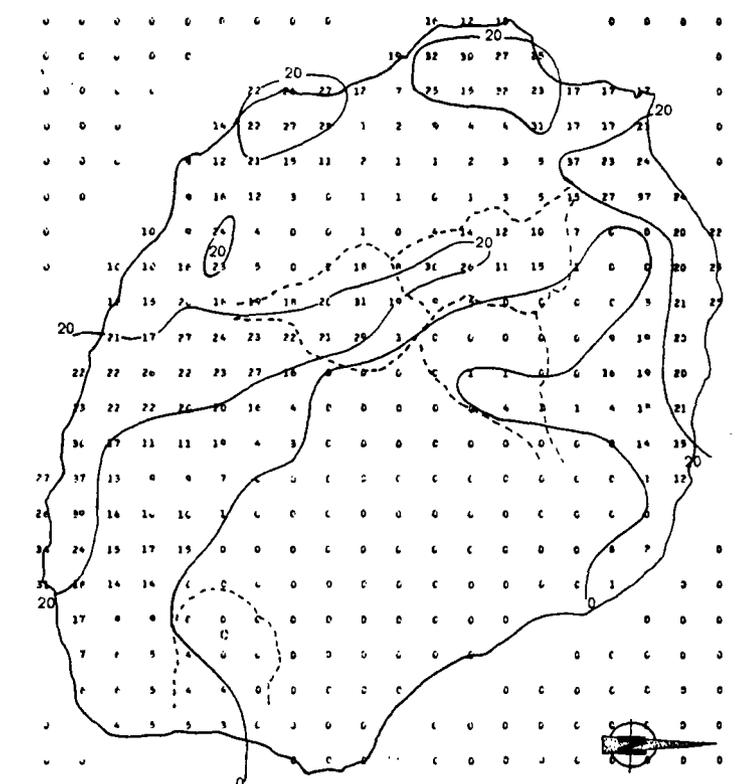
A - Année



B - Décembre



C - Janvier



D - Février

FIG. V.10 - Différences sur les pluies efficaces moyennes interannuelles obtenues en considérant des réserves en eau du sol de capacité 50 et 150 mm

Pour mieux cerner ce phénomène, nous avons repris l'étude dans les 19 mailles témoins précédemment étudiées (paragraphe 1.1., fig. V.5).

2.2.2. Etude régionale

Sur les hauts de l'Ouest (mailles 13 et 43), la saison sèche est très marquée avec 6 mois, de mai à octobre, ayant une pluviométrie moyenne inférieure à 60 mm, avec un minimum en août de 13 mm. Les pluies de décembre à avril sont cependant assez importantes (environ 1100 mm pendant 5 mois). Au point de vue des pluies efficaces, la saison sèche se prolonge en novembre et même en décembre si l'on considère une réserve du sol importante (moins de 10 mm en moyenne sur les 8 derniers mois de l'année avec une réserve de 150 mm). On observe ainsi au cours de l'année deux saisons bien différenciées qui se manifestent au niveau de l'humidité du sol par un assèchement à partir du mois de mai et une recharge de cette réserve au début de la saison humide en décembre et janvier. Ce cycle régulier aboutit ainsi à une différence sur les pluies efficaces du même ordre que la différence sur les réserves considérées (soit 100 mm si l'on considère des réserves respectivement de 50 et 150 mm).

Sur tous les hauts du secteur sous le vent, cette répartition est assez semblable avec cependant quelques originalités :

- Les deux cirques de Mafate (maille 91) et Cilaos (maille 122) ont une répartition de la pluviométrie assez semblable à celle des hauts de l'Ouest, avec cependant des épisodes pluvieux assez importants en août certaines années (1972-1973), qui relèvent ainsi la moyenne de ce mois et par contre des mois de novembre et décembre moins pluvieux. Les pluies de décembre ne sont relativement abondantes qu'une année sur deux environ et l'essentiel de la recharge de la réserve en eau du sol a lieu en janvier.
- Au niveau de la Plaine des Cafres (maille 174), les pluies de la saison sèche sont relativement plus abondantes (450 mm de mai à novembre, contre 300 seulement à Petite France), et empêche ainsi l'assèchement intégral de la réserve en eau du sol, même s'il n'y a pas d'eau disponible pour l'écoulement de septembre à novembre. La réserve n'étant pas totalement asséchée, la différence sur la pluie efficace résultant de la recharge de cette réserve reste inférieure à l'écart de ces réserves (80 mm à la Plaine des Cafres).

La Forêt des Macques et les Hauts du Tévelare (maille 67) sont la seule exception à cette relative homogénéité des hauts du secteur sous le vent. Le phénomène observé à la Plaine des Cafres est ici amplifié : il n'y a pas de mois vraiment très secs, la pluviométrie moyenne mensuelle est toujours supérieure à 70 mm (alors que 6 mois sont inférieurs à 60 mm à Petite France). Même si ces pluies sont souvent insuffisantes pour alimenter l'écoulement, elles maintiennent la majorité de l'eau dans le sol. Peu désaturée, cette réserve n'ampute la pluie efficace que de 20 mm en moyenne sur l'année.

Sur le littoral du secteur sous le vent (maille 32 et 99), la différence sur les pluies efficaces reste également inférieure à la différence sur les réserves considérées, mais la raison en est toute autre que pour la Plaine des Macques. Là au contraire, la saison sèche est très marquée (130 mm de pluie de mai à novembre sur la Plaine des Galets et vers St-Gilles), et par contre la saison humide n'est guère pluvieuse : seuls les mois de janvier et février ont une pluviométrie moyenne supérieure à 100 mm. En 11 ans, 8 mois sur 132 ont connu une pluviométrie supérieure à 200 mm et 2 seulement supérieure à 300 mm. Dans ces conditions, la réserve n'est que rarement saturée, surtout si on la considère assez importante. En considérant une E.T.P. de 150 mm pendant ces mois d'été sur le littoral, pour saturer une réserve de 150 mm, il faut donc une hauteur de pluie d'au moins 300 mm ; on n'aurait observé que 4 mois ayant une pluie efficace, sur la période considérée avec une réserve de 150 mm (9 mois avec une réserve de 50 mm).

Dans les zones littorales intermédiaires entre côte au vent et côte sous le vent, c'est-à-dire sur la côte nord-est vers St-Denis (maille 150) et au sud vers St-Joseph, l'alternance de saisons des pluies et saison sèche est toujours bien marquée : 6 mois dont la moyenne pluviométrique reste inférieure à 100 mm de juin à novembre, et environ 1200 mm sur les 4 premiers mois de l'année. La particularité de cette zone tient à l'irrégularité des pluies. Certains mois de saisons humides (février et mars 1971, février 1980) ont été peu pluvieux (moins de 100 mm) et des mois de saison sèche ont été au contraire relativement pluvieux (339 mm en août 1972, 141 mm en juillet 1978). On assiste ainsi à de petits cycles intermédiaires de décharge et surtout recharge de l'humidité du sol qui ampute d'autant la pluie efficace. On arrive ainsi à une perte moyenne annuelle de 115 mm supérieure à la variation sur les capacités de réserve de 100 mm.

TABLEAU V.4 - Influence de la capacité de la réserve disponible pour l'évapotranspiration (Ru) sur le bilan d'eau au sol - Application à 19 mailles de l'île de la Réunion pour des valeurs de Ru = 50 mm et Ru = 150 mm

N° maille	Nb mois Peff = 0 Ecart avec résultats RU=100mm		Etat de saturation de la réserve fin décembre		Valeurs moyennes interannuelles de Peff		
	RU = 50	RU = 100	RU = 50	RU = 150	P1 RU = 50	P2 RU = 100	P1 - P2
13	- 4	+ 7	(a)(b)(c) 8 2 1	(a)(b)(c) 2 8 1	233	156	77
32	- 3	+ 2	0 2 9	0 2 9	126	78	48
43	- 3	+ 4	9 2 0	8 3 0	974	876	98
59	- 7	+ 4	6 3 2	1 8 2	770	670	100
67	- 1	+ 1	9 1 0	9 2 0	1287	1265	22
91	- 8	+ 3	5 2 4	3 4 4	1137	1037	199
99	- 5	+ 4	1 1 9	0 2 9	166	94	72
112	- 4	+ 1	10 1 0	10 1 0	1509	1431	78
122	- 5	+ 3	2 3 5	0 5 6	881	783	98
144	- 3	+ 2	8 2 1	4 4 1	2162	2089	73
150	- 3	+ 2	5 1 5	2 4 5	701	585	116
174	- 5	+ 6	6 2 4	2 7 2	1220	1138	82
183	- 3	+ 1	9 2 0	6 5 0	2068	2023	45
208	- 2	+ 1	5 1 5	4 3 3	2200	2146	54
217	0	0	11 0 0	11 0 0	5932	5925	7
248	0	0	9 2 0	9 2 0	4259	4239	20
270	- 1	+ 1	11 0 0	10 1 0	2463	2433	30
285	0	0	9 2 0	9 2 0	2668	2650	18
300	0	0	11 0 0	11 0 0	4784	4774	10

(a) saturée - (b) partiellement saturée - (c) asséchée

Si l'on s'élève en altitude (Hauts de St-Denis, maille 112), ou si l'on descend vers le Sud (Salazie, maille 144), la pluviométrie moyenne augmente et en particulier celle de la saison sèche. Moins celle-ci sera sèche, et moins la réserve du sol aura de chance d'être totalement utilisée. La recharge de cette réserve et l'écart résultant sur les pluies efficaces en seront d'autant plus faibles. L'écart sur les pluies efficaces moyennes annuelles est d'environ 75 mm dans ces deux secteurs.

Plus on se rapproche des pôles de pluviométries maximales, et plus ce phénomène s'amplifie, la saison sèche s'amenuise jusqu'à quasiment s'annuler (5 pluies mensuelles sur 132 sont inférieures à 100 mm à Takamaka). La variation des pluies efficaces moyennes annuelles, en fonction de la valeur de la réserve, diminue dans le même sens. Cet écart est inférieur à 50 mm sur les hauts de St-Joseph (maille 208), les hauts de St-André (maille 183), ou vers St-Benoît (maille 270), il devient quasiment nul aux niveaux de pôles de pluviométrie. Vers Takamaka (maille 217), l'écart est de l'ordre du 1 % de la pluie efficace (7 mm sur 5930 mm).

2.3. Influence du pas de temps

L'approche du bilan d'eau au sol à pas de temps mensuel souligne bien l'important contraste saisonnier qui affecte l'île de La Réunion. Mais dans la mesure où les précipitations importantes sont souvent le fait de quelques jours, voir d'une fraction de journée, le pas de temps mensuel ne sous-estime-t-il pas trop ces fortes pluies en les pondérant sur l'ensemble du mois ? Leur effet au niveau du bilan est-il le même ?

Pour traiter ces questions, nous choisissons un secteur relativement défavorisé où l'évaluation précise de la pluie efficace prend tout son sens : il s'agit du secteur de Dos d'Ane (maille 59) que l'on peut intégrer à l'ensemble des Hauts de l'Ouest. Nous y disposons des valeurs quotidiennes de pluviométrie relevée à ce poste, pour l'ETP les valeurs mensuelles obtenues pour la maille 59 sont uniformément réparties en fonction du nombre de jour. Si la pluie annuelle est régulièrement supérieure à l'ETP correspondante (en moyenne interannuelle $P \approx 1600$ mm, $ETP \approx 1000$ mm) la saison sèche est bien marquée de mai à novembre, avec une très forte majorité de mois ayant une pluie efficace nulle (sur la période 1971-1981, 84 fois la pluie efficace mensuelle est nulle, dont 76 fois pendant les 8 derniers mois de l'année).

Nous comparons les résultats obtenus par les bilans effectués au pas de temps journalier, décadaire ou mensuel.

2.3.1. Différence sur les pluies efficaces en fonction du pas de temps sur l'ensemble de la période considérée 1971-1981

Les valeurs cumulées des 132 mois étudiées, exprimées en hauteur d'eau en mm, sont :

	Pluie =	17 989.2	
	ETP =	11 083.1	
par bilan journalier :	P_{eff_J} =	9 719.9	ETR_J = 8 277.8
par bilan décadaire :	P_{eff_D} =	9 533.6	ETR_D = 8 514.7
par bilan mensuel :	P_{eff_M} =	9 243.7	ETR_M = 8 797.4

Sur la période 1971-1981, l'approche mensuelle du bilan d'eau conduit à une faible sous-estimation (5 %) de la pluie efficace par rapport à l'approche journalière ; l'approche décadaire donne des valeurs intermédiaires. Les résultats sont bien sûr opposés pour l'évaluation de l'ETR.

2.3.2. Distribution mensuelle de l'écart entre les pluies efficaces obtenues à différents pas de temps

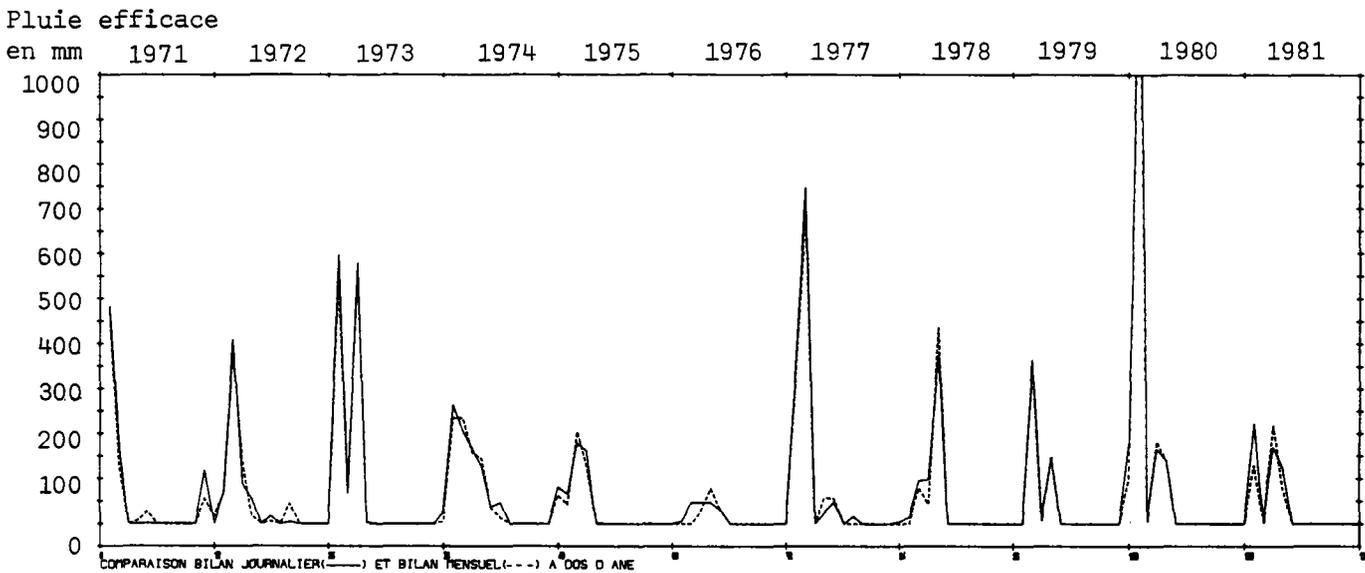
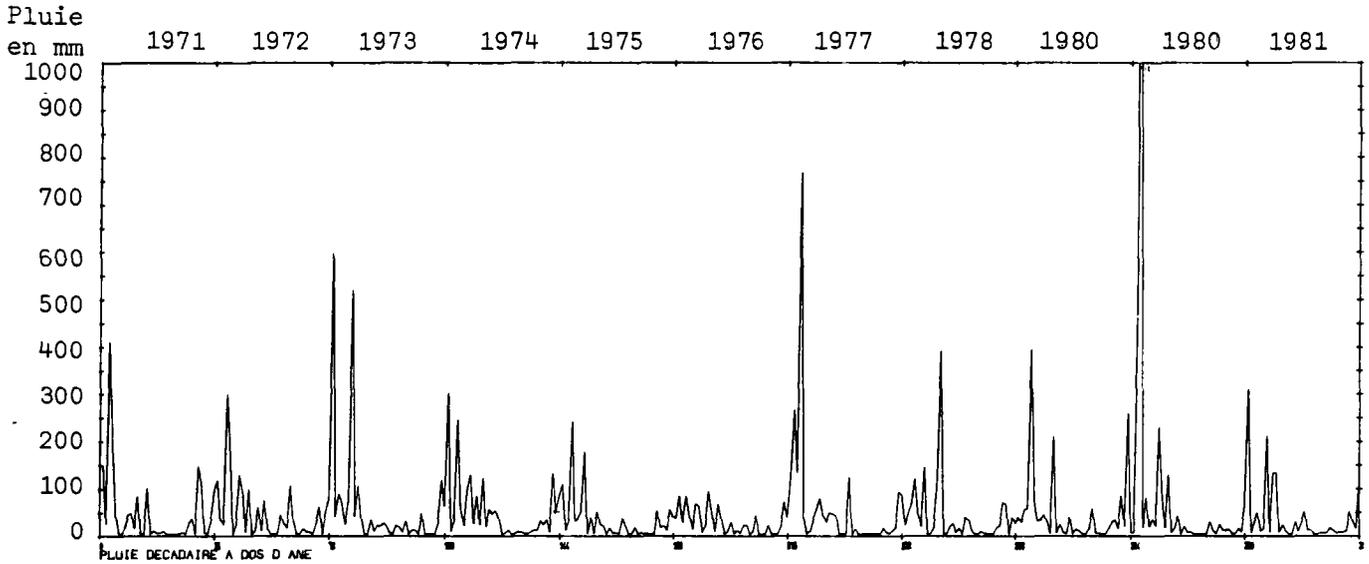
Si globalement le bilan mensuel conduit à des valeurs de pluie efficace plus faibles que le bilan décadaire ou journalier, ce n'est cependant pas systématiquement le cas, comme l'illustre la figure V.11 :

- 98 fois la pluie efficace est la même ; en général, elle est alors nulle,
- 36 fois le bilan mensuel conduit à des valeurs inférieures de la pluie efficace que le bilan journalier,
- 18 fois le bilan mensuel conduit à des valeurs supérieures de la pluie efficace que le bilan journalier.

Ces écarts en faveur du bilan mensuel peuvent atteindre des ordres de grandeur comparables à ceux favorables au bilan journalier : en mars 1972, il est de + 52 mm, soit près de 60 % de la pluie efficace ; l'écart opposé maximum observé est de 93.5 mm en janvier 1981, soit 42 %.

(tableau V.5).

FIG. V.11 - Comparaison des pluies efficaces mensuelles obtenues à Dos d'Ane sur la période 1971-1981, par bilan d'eau à pas de temps journalier et mensuel
 Les hauteurs de pluies décadaires relevées à Dos d'Ane sur cette période permettent de situer ces écarts en fonction de la pluviométrie.



Pour les 18 cas où le bilan mensuel conduit à des valeurs supérieures de la pluie efficace, nous observons qu'en début du mois considéré, la réserve donnée par le bilan mensuel est supérieure à celle du bilan journalier (tableau V.5) ; l'écart observé sur la réserve est toujours supérieur (ou égal) à celui observé sur la pluie efficace.

La tendance générale de l'écart sur les pluies efficaces est de réduire ou de s'opposer au déséquilibre apparu le (ou les) mois précédent(s). Si les mois de Janvier à Mars sont ceux où les écarts en faveur du bilan journalier sont les plus nombreux, le mois d'avril apparaît comme celui où le plus souvent le bilan mensuel conduit à des valeurs supérieures (annexe V.2).

Les valeurs résultant du bilan décadaire sont en général intermédiaires entre les résultats des deux autres approches, exceptionnellement elles peuvent être valeurs extrêmes (janvier 1975, mars 1980, annexe V.2).

Remarque. La comparaison des valeurs décadaires obtenues par bilan journalier et décadaire aboutit aux mêmes conclusions. Le plus souvent le pas de temps le plus grossier conduit à de plus faibles valeurs de pluie efficace, mais les écarts inverses ne sont pas négligeables pour autant (33 écarts positifs pour 40 négatifs et 323 égalités).

L'écart entre les pluies efficaces obtenues sur un mois donné à différents pas de temps est bien sûr essentiellement orienté par la hauteur de pluie du mois considéré, le nombre de jours de pluie et la distribution de ces jours de pluies (annexe V.2). L'état de la réserve en début de mois conditionne également ces valeurs. Entrent de ce fait en ligne de compte les hauteurs de pluies du mois précédent et la capacité de la réserve.

2.3.3. Influence cumulée de la capacité de la réserve en eau du sol et du pas de temps

Comme nous l'avons remarqué au paragraphe précédent (2.2.), la pluie efficace est d'autant plus élevée que la réserve maximale en eau du sol est faible. Cet écart observé sur le bilan mensuel augmente avec

la réduction du pas de temps du bilan (nombre d'autant plus élevé de phases de décharges et de recharge de cette réserve, chaque recharge amputant la pluie efficace).

TABLEAU V.6 - Valeurs de pluie efficace cumulée sur la période 1971-1981 à Dos d'Ane

	RU 50 mm (1)	RU 100mm (2)	(1)-(2)	$\frac{(1)-(2)}{(2)} \times 100$
Bilan journalier (J)	10 673.2	9 719.9	953.3	9.8
Bilan décadaire (D)	10 218.1	9 533.6	684.5	7.18
Bilan mensuel (M)	9 756.5	9 243.7	512.8	5.55
Ecart J-D	455	186.3	268.7	
(J-D)/J	4.26	1.92		
Ecart J-M	916.7	476.2	440.5	
(J-M)/J	8.59	4.90		
Ecart D-M	461.7	289.9	171.8	
(D-M)/D	4.52	3.04		

A ce fait, pour une plus faible valeur de la capacité en eau, l'écart sur les pluies efficaces calculées aux différents pas de temps augmente également, le bilan mensuel sous-estime la pluie efficace calculée au pas de temps journalier de 8.6 % pour une réserve de 50 mm (sous-estimation de 4.9 % pour une réserve de 100 mm).

Nous observons aussi une augmentation de la proportion de mois conduisant à une telle sous-estimation :

- 71 égalités,
- 47 fois le bilan mensuel sous-estime la pluie efficace/bilan journalier,
- 14 fois le bilan mensuel sur-estime la pluie efficace/bilan journalier.

Si au contraire, on considérait une capacité de réserve plus élevée 150 ou 200 mm, le phénomène inverse se produirait. Globalement les écarts cumulés deviendraient négligeables.

2.3.4. Influence des hauteurs de pluie

Afin d'éviter une analyse systématique de l'influence du pas de temps sur les valeurs de pluies efficaces dans les différentes conditions climatiques de l'île, nous nous contentons d'étudier deux cas simulés extrêmes, obtenus en considérant respectivement les hauteurs de pluie à Dos d'Ane divisées par deux, et multipliées par deux pour les valeurs identiques d'ETP.

Dans un cas, les hauteurs de précipitations mensuelles sont en moyenne inférieures à l'ETP, dans l'autre cas elles sont largement supérieures (annexe V.2).).

L'écart cumulé brut en faveur du bilan journalier est toujours du même ordre de grandeur (400 mm). En valeur relative, il est au contraire d'autant plus important que la hauteur de pluie est faible (16 % pour le cas P/2, 1.6 % pour le cas P*2).

C'est donc bien dans les zones déficitaires que le pas de temps mensuel conduit à la sous-évaluation relative la plus importante de la pluie efficace globale sur une longue période. Le bilan mensuel d'eau du sol donne des valeurs par défaut de la pluie efficace, mais en respecte la répartition spatiale.

3. APPROCHES SIMPLIFIEES DE LA PLUIE EFFICACE

3.1. Approche globale sur de petites unités géographiques

Les modèles globaux de simulation de bassin hydrologique que nous avons employé (4ème partie) considère le bassin comme unité du système. La fonction de production effectue le bilan d'eau au sol à partir des données climatiques moyennes au niveau du bassin. Dans les conditions climatiques de La Réunion, notamment les forts contrastes pluviométriques, cette approche du bilan d'eau n'entraîne-t-elle pas des erreurs en lissant ainsi les différentes valeurs ?

Afin d'étudier les conséquences de cette démarche, nous considérons différentes unités représentatives des différentes conditions climatiques de l'île (fig. V.12). Il ne s'agit pas de bassins versants réels, mais d'esquisses réalistes de bassins, constituées de 5 à 17 mailles entières, se répartissant sur les différentes régions de l'île.

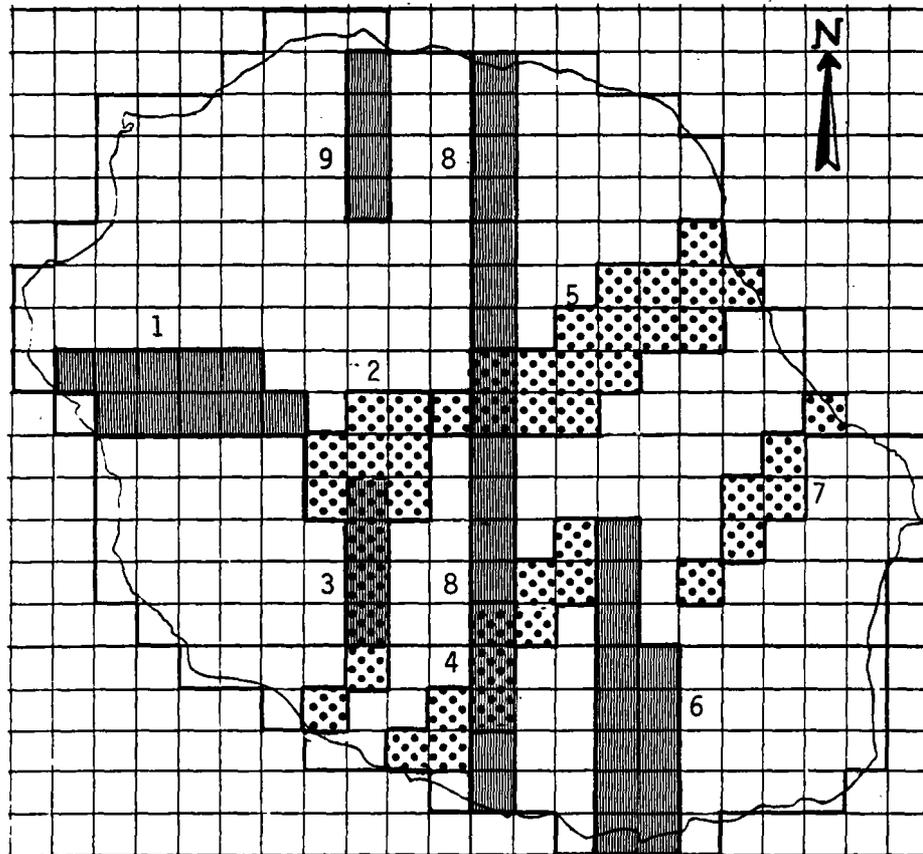


FIG. V.12 - Approche globale du bilan d'eau
Sélection de petites unités en différentes
régions de l'île de La Réunion

Nous comparons sur chaque unité les valeurs sur la période 1971-1981 de la pluie efficace obtenue par moyenne des différentes pluies efficaces découlant de l'application du bilan en chaque maille ($Peff_1$) et de celle obtenue par un bilan du niveau global de l'île ($Peff_2$) à partir des diverses données climatiques moyennes du bassin :

$$Peff_1 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N Peff_m$$

où $Peff_m$ est la pluie efficace obtenue en chaque maille à partir des valeurs de la maille P_m , ETP_m , RU_m ,

$Peff_2$ = pluie efficace obtenue par bilan des valeurs moyennes au niveau du bassin des valeurs de P_B , ETP_B et RU_B

avec pour chaque facteur $X_B = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N X_m$

En valeurs cumulées sur les 132 mois de la période 1971-1981, l'approche par le bilan des données moyennes du bassin $Peff_2$ sous-estime la pluie efficace de 0 à 5 % selon les unités (tableau V.7). Ces écarts

	Pluie efficace cumulée des mailles Peff 1	Pluie efficace par bilan moyen sur l'unité Peff2	Ecart Peff1 - Peff2	Ecart relatif $\frac{Peff1 - Peff2}{Peff1}$	Régressions linéaires établies sur valeurs non nulles $Peff2 = a * Peff1 + b$		
					a	b	Nb de valeurs
1	7 663.7	7 551.0	112.7	1.5	1.009	- 1.6	46
2	9 327.0	8 880.0	447.0	4.8	1.012	- 7.5	42
3	7 924.6	7 886.3	38.3	0.5	1.005	- 0.8	42
4	8 679.5	8 172.7	506.8	5.8	1.011	- 3.0	44
5	43 728.9	43 585.7	143.2	0.3	1.002	- 1.5	122
6	23 450.9	23 019.3	431.6	1.8	1.010	- 4.8	96
7	61 661.2	61 430.2	231.	0.4	1.001	- 2.2	129
8	18 276.8	17 459.8	817.	4.5	1.010	- 6.7	81
9	13 689.6	13 316.6	373.	2.7	1.015	- 5.4	65

les coefficients de corrélation sont tous supérieurs à 0.99

TABEAU V.7 - Comparaison entre les pluies efficaces obtenues par moyennes sur les mailles des unités et celles obtenues par un bilan au niveau de l'unité à partir des moyennes des facteurs climatiques

les plus importants sont observés à Cilaos (2), la Plaine des Cafres (4), bassins issus de la zone centrale et s'écoulant sur la côte sous le vent, et sur le profil N.S. de l'île (8). Ces écarts sont particulièrement faibles sur les bassins très arrosés (5 et 7).

Il existe des corrélations très étroites entre les deux séries de valeurs sur toutes les unités (tableau V.7).

Au niveau de la distribution mensuelle, ces écarts sont majoritairement en faveur de la moyenne des pluies efficaces (fig. V.13.a), mais il arrive également que le bilan sur les données moyennes donne des valeurs plus élevées. Les écarts sont le plus souvent de l'ordre de quelques millimètres, ils atteignent ou dépassent exceptionnellement 50 mm comme en février-mars 1974 sur la zone 4.

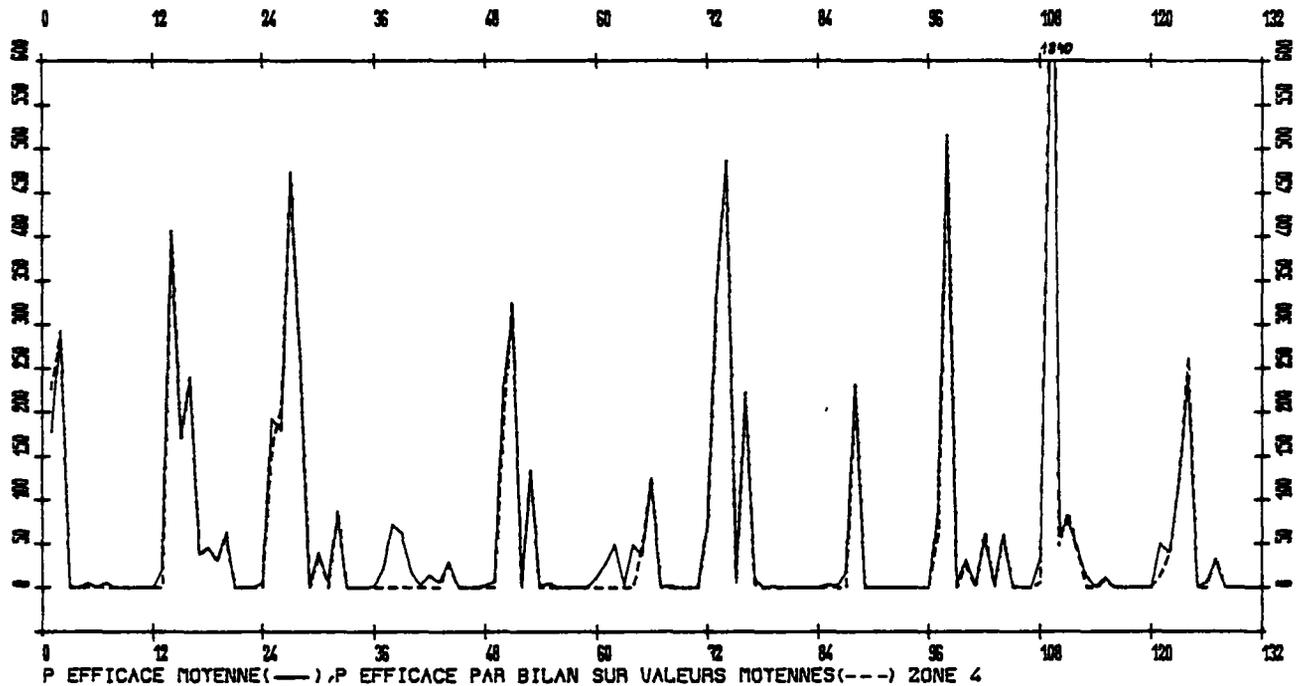


FIG. V.13 a - Comparaison des pluies efficaces obtenues par bilan global au niveau de l'unité, et des moyennes de pluie efficace des mailles constituant l'unité - Résultats pour la zone 4

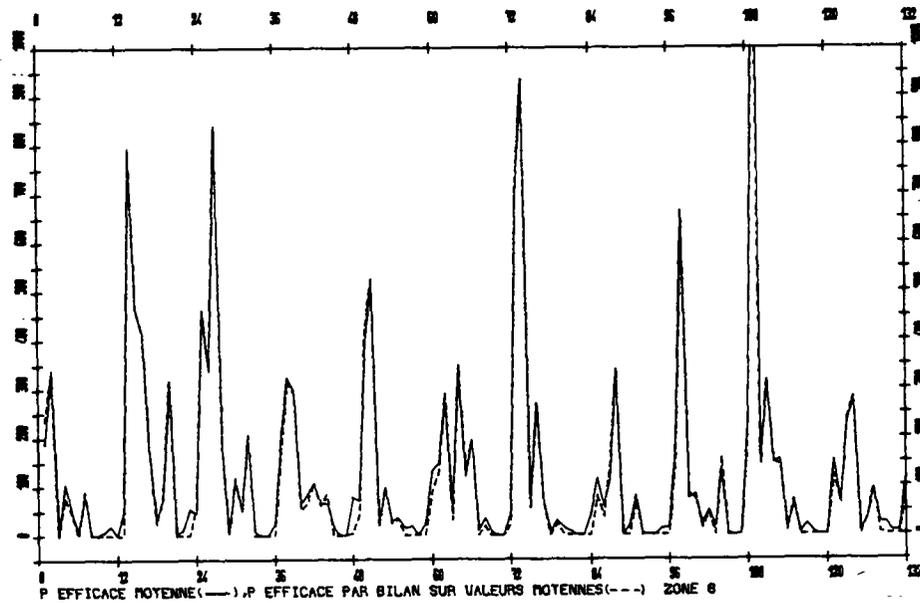
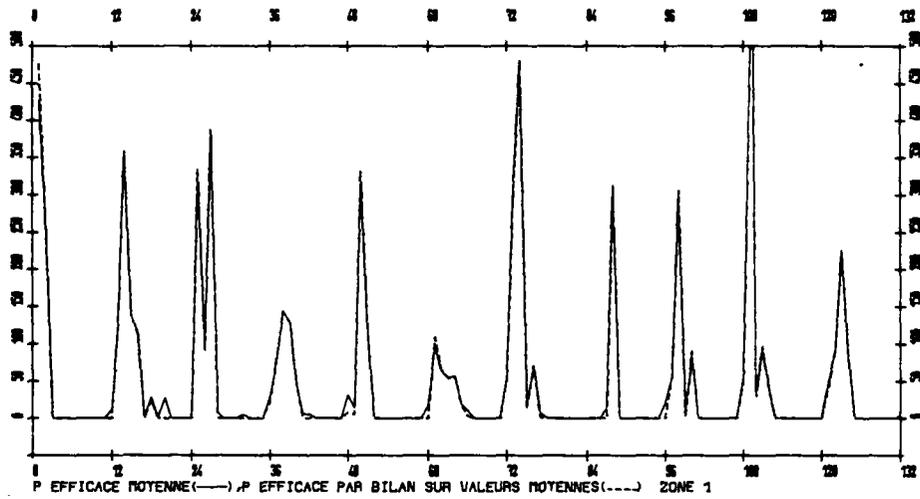
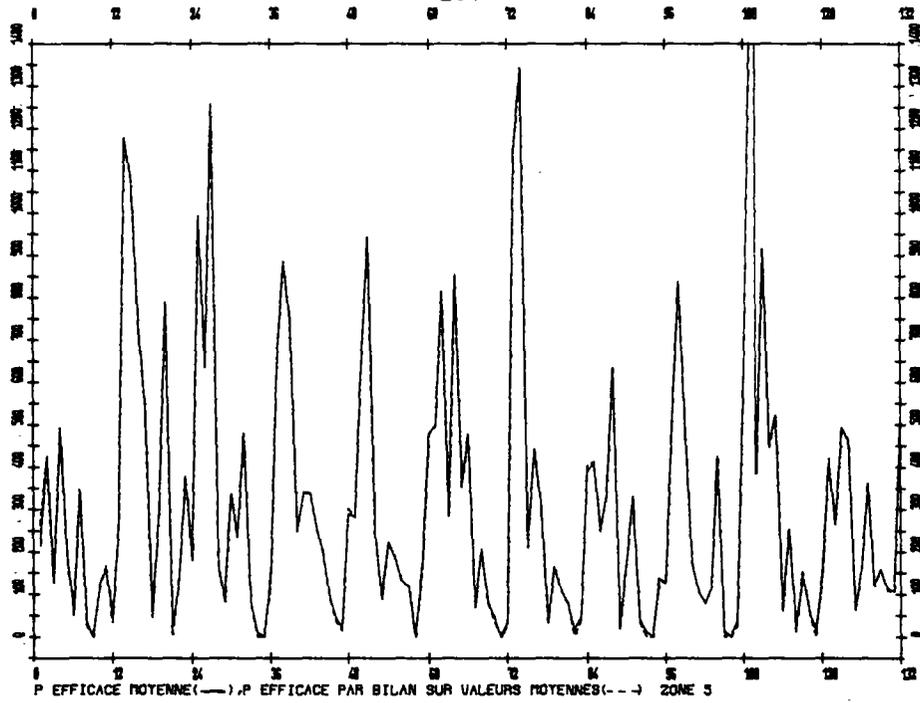


FIG. V.13 b, c, d - Comparaison des pluies efficaces obtenues par bilan global au niveau de l'unité, et des moyennes de pluie efficace des mailles constituant l'unité - Résultats pour les zones 5, 1 et 8

Pour le bilan sur les valeurs moyennes, la réserve est totalement asséchée fin 1973 et les pluies de février et mars (≈ 150 mm en moyenne sur le secteur) suffisent juste à reconstituer les réserves sans produire d'écoulement. Par contre, sur les mailles du secteur amont, les pluies les plus importantes et la réserve pratiquement saturée de fin décembre assurent un écoulement relativement important qui influence beaucoup la valeur moyenne au niveau de l'unité surtout si les mailles du secteur aval ne produisent pas d'écoulement.

Sur les unités bien arrosées (5) (fig. V.13 b), il n'existe pas un tel contraste entre secteurs produisant ou ne produisant pas de pluie efficace sur les mêmes mois. Il en est de même pratiquement sur les hauts de l'Ouest (1) (fig. V.13.c) où simultanément toutes les mailles ont de la pluie efficace ou aucune n'en présente.

C'est bien évidemment ce contraste entre zones très arrosées et peu arrosées d'une même unité, qui se manifeste par des mailles présentant des pluies efficaces et d'autres pas, qui est à l'origine des écarts observés sur le profil Nord-Sud (zone 8) (fig. V.13 d).

3.2. Relations entre les hauteurs de pluies et des pluies efficaces

Etant donné les amplitudes modestes des variations de l'ETR tant dans le temps que dans l'espace, nous avons étudié dans quelle mesure l'approche de la pluie efficace par simple relation linéaire à partir de la pluie semble correcte, d'abord pour des relations établies sur l'ensemble de l'île et ensuite sur une seule maille.

3.2.1. Relations établies sur l'ensemble des 304 mailles

Valeurs annuelles.

Les coefficients de corrélation établis pour chaque année sont supérieurs à 0.99, sauf pour l'année 1971 (année de faible pluviométrie). Les coefficients de régression a et b varient respectivement de 0.88 à 0.99 et de -748 à -1011. (annexe V.3).

La confrontation des points représentatifs de la relation entre P et P_{eff} et de la droite de régression montre qu'en général les points sont au dessus de la droite pour les faibles et fortes valeurs et au-dessous pour les valeurs moyennes, comme par exemple en 1975 (fig. V.14 a). Il ne semble pas utile cependant de considérer d'autre type de relation, car certaines années telles 1977 (fig. V.14 b) ne correspondent pas du tout à ce schéma. La dispersion des points s'observe uniquement sur les valeurs moyennes de part et d'autre de la droite de régression.

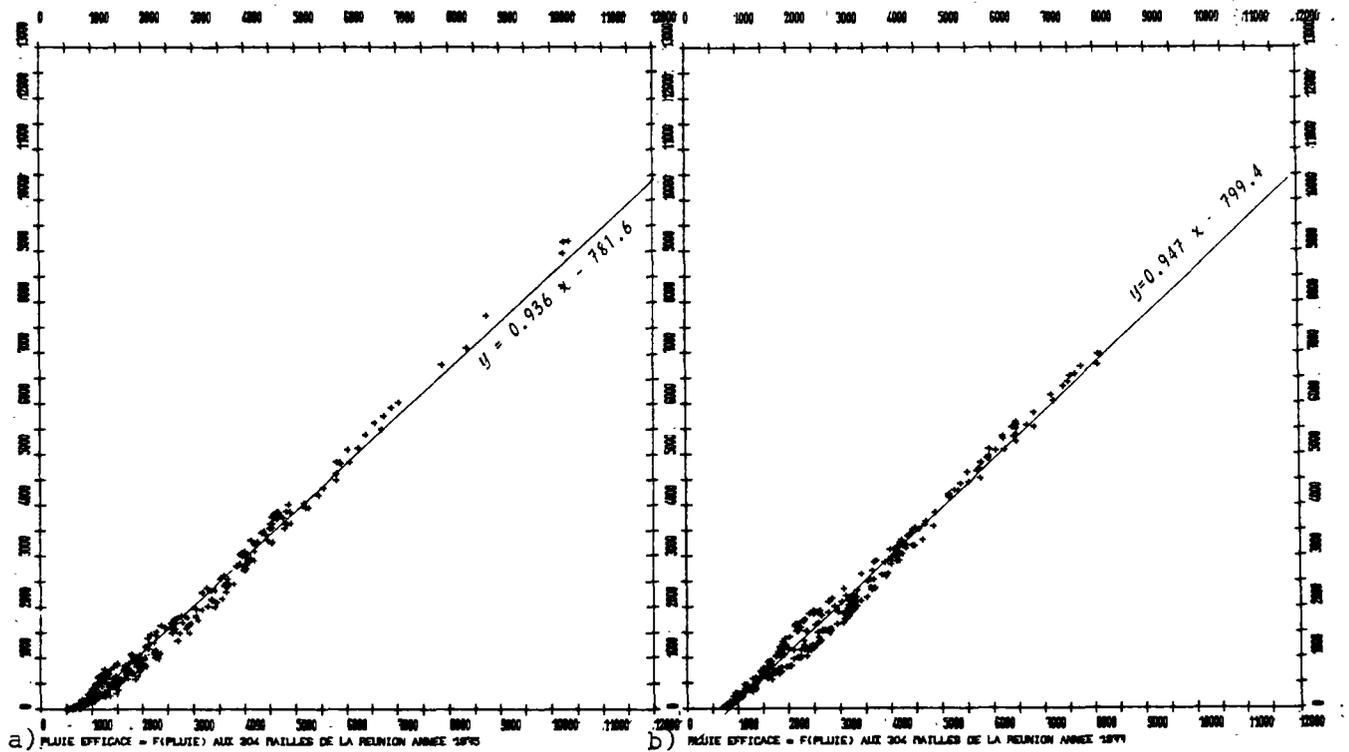


FIG. V.14 - Relations annuelles entre les pluies et pluies efficaces des 304 mailles de La Réunion - Valeurs pour les années 1975 (a) et 1977 (b)

Géographiquement, cette dispersion des points de part et d'autre de la droite de régression, correspond à un découpage de l'île assez uniforme d'une année à l'autre. Ainsi que le montre la figure V.15, la pluie efficace calculée par régression à partir de la pluviométrie est supérieure à la pluie efficace obtenue par le bilan aux différentes mailles sur les zones littorales du Nord-Est de St-Denis à St-Benoit et Sud-Est de Piton Ste-Rose à St-Louis, voire parfois quelques mailles jusqu'à St-Leu avec un développement important sur la plaine des Cafres. Les écarts maxima sont de l'ordre de 300 à 400 mm dans les régions de St-André, et de St-Joseph - St-Philippe. A l'opposé, toute la zone centrale de l'île se prolongeant sur tout le littoral Ouest et comprenant les pôles de pluviométrie maximum présente des écarts inverses : ceux-ci sont maximums (également 3 à 400 mm) sur le littoral de St-Gilles, la plaine du Grand Bénare et la Plaine des Sables, parfois aux pôles de pluviométrie maximum de Takamaka et Rivière de l'Est pour l'année 1971. Cette répartition des écarts sur les pluies efficaces présente de fortes similitudes avec celle de l'ETR (figure V.2.b)

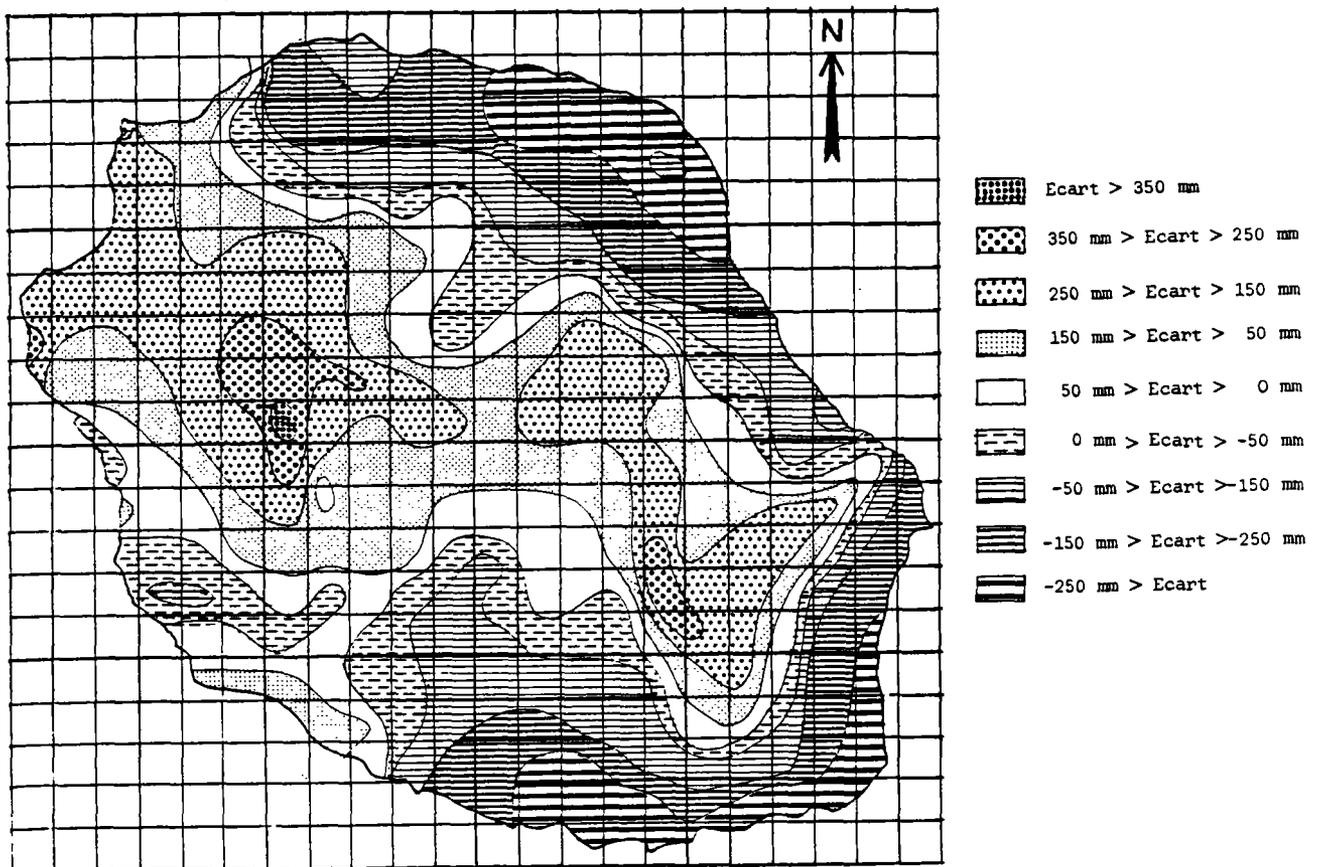


FIG. V.15 - Ecart entre les valeurs moyennes interannuelles de la pluie efficace calculée par bilan d'eau et de la pluie efficace approchée d'après une relation linéaire globale avec la pluie

L'application la plus intéressante de ces régressions linéaires serait de définir pour une année donnée la valeur de la pluie efficace en une maille à partir de la valeur de la pluie et de la régression linéaire établie sur les valeurs moyennes interannuelles.

Si au niveau global de l'île, l'écart relatif entre la pluie efficace obtenue par le bilan d'eau et celle déduite de la régression linéaire n'excède pas quelques pourcents, au niveau d'une maille donnée, cet écart peut atteindre 4 à 500 mm, soit, dans les zones peu arrosées où l'évaluation de la pluie efficace est la plus préoccupante, des écarts relatifs inacceptables atteignant 100 à 200 %.

Valeurs moyennes mensuelles

Les coefficients de corrélation sont là aussi très élevés ($R > 0,49$), sauf pour les mois de septembre à octobre. On remarque d'ailleurs que les différents coefficients (r , a et b) varient dans le même sens que la hauteur des pluies et pluies efficaces, et ainsi toutes les valeurs moyennes mensuelles de ces différents termes se répartissent entre celles obtenues pour les mois de janvier et octobre.

	Hauteur moyenne		Coefficient de corrélation	Coefficient de régression linéaire	
	pluie (en mm)	pluie efficace (en mm)		a	b
Janvier	549.6	417.1	0.998	1.029	-148.3
Octobre	79.	21.	0.937	0.627	- 28.5

La dispersion est surtout importante sur les faibles valeurs, ce qui explique les plus faibles coefficients de corrélation sur les mois d'hiver moins pluvieux présentant dans de nombreuses mailles des valeurs très faibles à nulles de pluie efficace. En octobre, 180 mailles présentent une pluie efficace nulle. En éliminant ces valeurs nulles, on améliore les relations obtenues. Ainsi, en octobre, à partir de 124 mailles, on obtient : $R = 0.974$, $A = 0.833$, $B = -64.5$ (annexe V. 3). Les résultats annuels seraient encore plus proches les uns des autres en ne considérant que les mailles présentant des valeurs de pluies efficaces supérieures à 200 mm.

Si l'ajustement des points sur une droite est très bon pour les valeurs élevées (voir figure V.16), il semble que pour les valeurs faibles à moyennes ($P_{eff} < 200$ mm notamment) les points ont plutôt tendance à décrire une fonction de type : $P_{eff} = a P^{\alpha}$.

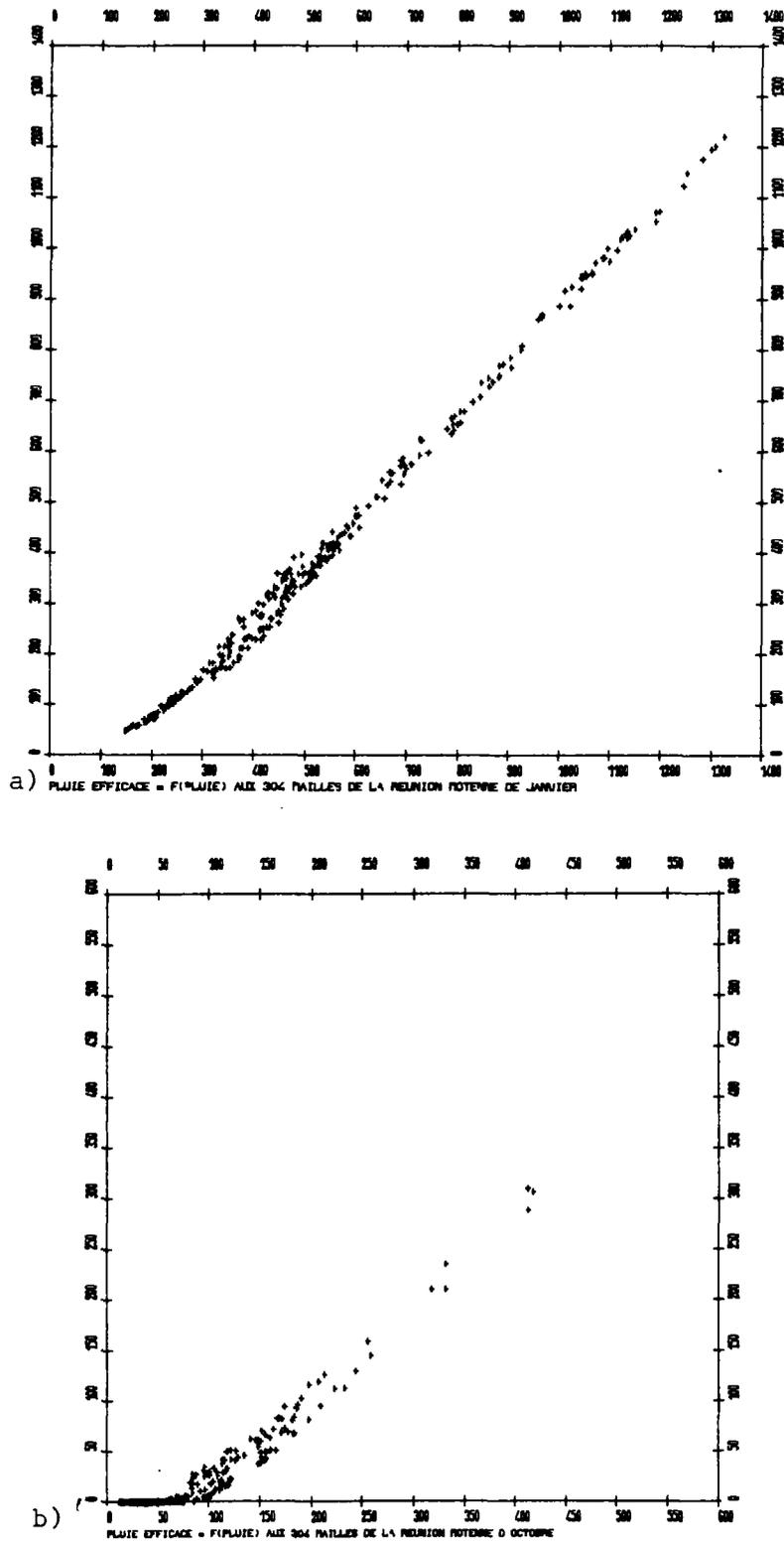


FIG. V.16.- Relations entre les pluies et les pluies efficaces aux 304 mailles de La REUNION - Valeurs moyennes des mois de Janvier (a) et Octobre (b)

3.2.2. Relations établies sur les 132 valeurs mensuelles d'une maille

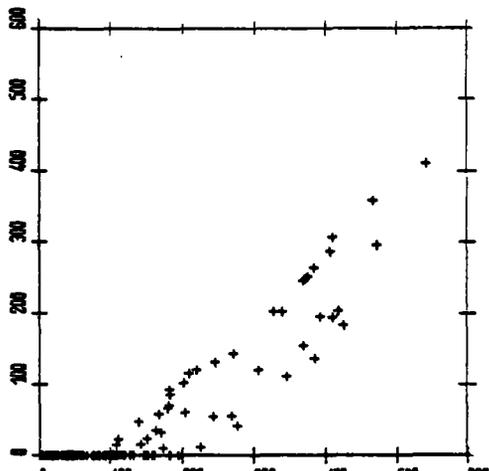
Nous avons repris les 19 mailles étudiées précédemment (cf § 1.3.). Nous observons une nouvelle fois que les coefficients de corrélation sont plus élevés dans les zones pluvieuses ($r > 0.99$, si hauteur de pluie moyenne annuelle > 2.5 m) (annexe V.3).

Dans les zones à forte corrélation, les coefficients de la régression linéaire a et b varient respectivement de 0.95 à 1 et de -70 à -110. Dans les mailles peu pluvieuses (littoral ouest), ces coefficients sont de l'ordre de 0.5 et 30 ; en fait une dizaine de mois seulement connaissent une pluie efficace non nulle.

Dans les régions intermédiaires, par exemple la maille 150, la dispersion des valeurs est assez importante, comme le montre la figure V.17 a, surtout comparée à celle des valeurs de la maille 217 (Takamaka) (fig V.17 b).

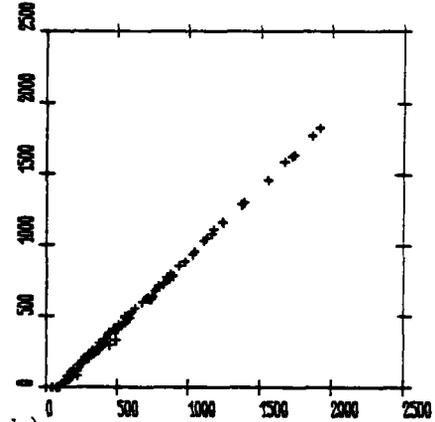
Une nouvelle fois des relations ne donnent des résultats satisfaisants que dans les zones à forte pluviométrie et laissent subsister des incertitudes importantes dans les régions défavorisées.

Peff (mm)



a) PLUIE EFFICACE = F(PLUIE) A LA MAILLE 150 P (mm)

Peff (mm)



b) PLUIE EFFICACE = F(PLUIE) A LA MAILLE 217 P (mm)

FIG. V.17 - Relation entre les pluies efficaces et les pluies aux mailles 150(a) et 217(b)

4. CONCLUSION

La distribution tant dans le temps que dans l'espace de la pluie efficace présente des analogies flagrantes avec celle de la pluie.

Tout le littoral Ouest reçoit peu de pluie efficace, ces apports étant pratiquement nuls durant toute la saison sèche. Durant la période 1971-1981, la région du Port n'aurait connu que 7 mois avec des précipitations efficaces.

L'étude fréquentielle confirme la faiblesse des apports efficaces sur la côte sous le vent qui, à l'exclusion du secteur de la plaine des Makes, ne reçoit pas de pluie efficace une année sur dix ; une année sur deux cet apport reste inférieur à 500 mm et il est concentré sur les quelques mois de saisons des pluies, pendant toute la période de mai à novembre il n'y a pas d'apport. On conçoit alors l'importance que revêt pour la population des "Hauts" de l'Ouest, l'étude des eaux souterraines de ce secteur.

La surévaluation de 20 % de l'ETP calculé par la formule mensuelle de Turc affecte les valeurs de pluie efficace essentiellement dans les zones pluvieuses (où la pluie est capable de satisfaire ces besoins supplémentaires), mais les variations observées y sont alors de l'ordre de l'imprécision sur la mesure et l'interpolation des hauteurs de pluie. Cette intégration de l'ETP n'affecte pratiquement pas les régions deshéritées de la côte Ouest.

Si au niveau global de l'île, la valeur de la capacité de la réserve en eau du sol affecte peu la pluie efficace moyenne annuelle, son effet est déjà plus sensible sur les mois de décembre, janvier et février, mois assurant l'essentiel de la recharge de cette réserve. Régionalement, l'effet est négligeable sur les régions très arrosées, il n'intéresse que quelques mois dans les secteurs au contraire déficitaires. Par contre la définition assez précise de la capacité de réserve en eau du sol paraît plus préoccupante dans les régions intermédiaires : Hauts de l'Ouest et littoral des régions limites entre côte au vent et sous le vent (secteur de St-Denis au Nord, et St-Joseph au Sud), l'écart observé sur les pluies efficaces annuelles étant même supérieur à celui sur la valeur de la réserve considérée (plusieurs cycles de recharge et décharge de cette réserve).

Considérer un pas de temps mensuel pour l'étude du bilan conduit à sous-évaluer la pluie efficace obtenue par un bilan journalier. Mais dans le cas de Dos D'Ane (hauts de l'Ouest), l'écart relatif sur les valeurs moyennes annuelles reste inférieur à 5 %. Cet écart est bien sûr plus important sur un mois donné, mais il n'est pas systématiquement en faveur du bilan journalier. Cet écart relatif tend à augmenter si l'on considère une capacité de réserve en eau du sol plus faible et également pour des hauteurs de pluies plus faibles. C'est donc dans les zones fortement déficitaires que le pas de temps du bilan joue un rôle notable (entraînant un écart relatif sur les hauteurs moyennes de pluie efficace supérieur à 15 %).

L'approche des apports nets sur une unité à partir d'un bilan global faisant intervenir des valeurs de pluie et ETP représentatives de cette unité, telle qu'elle est effectuée lors de l'utilisation des modèles globaux de simulation hydrologique, reproduit assez fidèlement celle découlant de l'application d'un bilan en chaque maille de l'unité. L'écart entre ces deux approches est pratiquement nul dans les zones très arrosées ou à comportement climatique homogène. Il demeure très acceptable (< 6 % en valeur relative sur la période 1971-1981) dans les zones au contraire très contrastées climatiquement ; cet écart est déterminé par quelques mois dans l'année où les conditions différentielles de saturation s'ajoutent à la différence de hauteur de pluie entre différentes mailles de l'unité (quelques mailles largement excédentaires en pluie mais qui, au niveau, de l'unité ne compensent pas la majorité de mailles déficitaires).

La majorité des unités hydrologiques de l'île sont suffisamment réduites ou sont situées dans un contexte climatique et surtout pluviométrique relativement homogène -c'est le cas des bassins étudiés par les modèles globaux de simulation- pour que cette approche globale du bilan soit très satisfaisante. Les fichiers climatiques [3] des mailles de La Réunion permettent d'obtenir rapidement les valeurs moyennes par unité de la pluie et de l'ETP.

L'étude particulière de quelques mois donnés sur une unité à fort contraste pluviométrique mérite une approche du bilan en chacune de ces mailles.

Les différentes régressions linéaires établies à différentes échelles de temps et d'espace entre la pluie efficace et la pluie montrent que mise à part pour l'évaluation globale de l'île ou dans les zones très pluvieuses, l'utilisation de cette méthode pour déterminer simplement la pluie efficace reste très approximative. Les zones "sous le vent" de l'île sont très mal approchées par ces relations, alors que ce sont ces régions défavorisées qui demandent l'évaluation la plus précise des apports efficaces.

Ces valeurs de pluies efficaces, ainsi que celles des pluies et des ETP, en chaque maille, constituent des fichiers de données implantés sur micro-ordinateur au SGR Réunion [3]. Les petits programmes de traitement associés permettent de calculer les précipitations efficaces de la période étudiée 1971-1981, sur une unité quelconque de l'île (bassin versant, commune) et d'effectuer des traitements statistiques sur ces données.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ARLERY, GARNIER, LANGLOIS (1954) .- Application des méthodes de Thornthwaite à l'esquisse d'une description agronomique du climat de la France .- In La Météorologie, Octobre-décembre 1954, pp. 345-367
- [2] BARGEAS A. (1981) .- Programmes de calcul de paramètres hydrologiques pour la calculatrice TI59 - Déficit d'écoulement annuel - Hydrogrammes crues (S.C.S.) - Evapotranspiration réelle .- Rapport BRGM 81 REU 24, 40 p.
- [3] BARGEAS A. (1984) .- Approche du bilan hydrologique de l'île de La Réunion - Mise en place sur micral de fichiers de données et de programmes de traitement .- BRGM, SGN/EAU - Note technique n° 84/04, 27 p. + 1 fasc. annexe.
- [4] THORNTHWAITTE C.U. (1946) .- An approach toward a national classification of climate .- Trans. Amer. Geophys. Union, vol. 27, pp.99-106

ANNEXES

ANNEXE V.1

BILAN D'EAU AU SOL
 SELON LA METHODE DE THORNTHWAITE

L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau effectivement évapotranspirée quand les apports d'eau sont suffisants ; elles constituent une approche par excès de l'évapotranspiration réelle (ETR). Pour appréhender l'ETR et l'excédent d'eau alors disponible pour l'écoulement (potentiel d'écoulement ou pluie efficace), THORNTHWAITE propose d'effectuer un bilan au niveau du sol

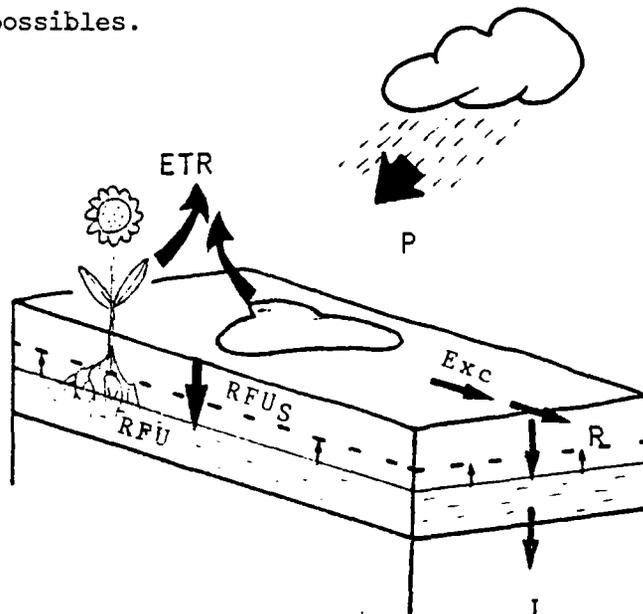
Le sol ne retient efficacement qu'une quantité maximum d'eau -la capacité au champ-. Au delà de cette limite, l'eau excédentaire participe à l'écoulement (de surface ou souterrain).

Les plantes, par l'intermédiaire de leurs racines, ne peuvent plus puiser l'eau du sol en deçà d'une certaine limite -le point de flétrissement-. La réserve en eau du sol disponible pour les plantes se situe donc entre ces deux valeurs (capacité au champ et point de flétrissement) elle est souvent appelée "Réserve Utile" (RU).

Cette réserve utile (RU) est un réservoir tampon entre, d'une part, les apports par précipitation (P) et la demande par évapotranspiration potentielle (ETP) ; son débordement éventuel constitue la pluie efficace.

Le bilan est donc effectué à pas de temps donné entre les trois grandeurs P, ETP et RU. Selon les valeurs respectives de ces mailles, différents scénarios sont possibles.

P > ETP



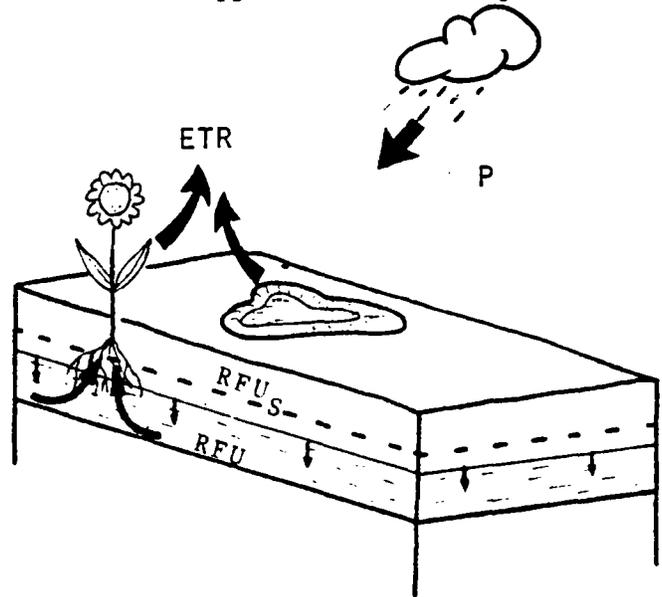
$$ETR = ETP$$

La différence éventuelle $P - ETP$ recharge l'humidité du sol, jusqu'à saturation de celui-ci ($R.U_S$). A ce moment, il y a un excédent (Exc) disponible pour l'écoulement.

$P < ETP$

La réserve du sol intervient alors en apport d'eau et s'ajoute aux précipitations.

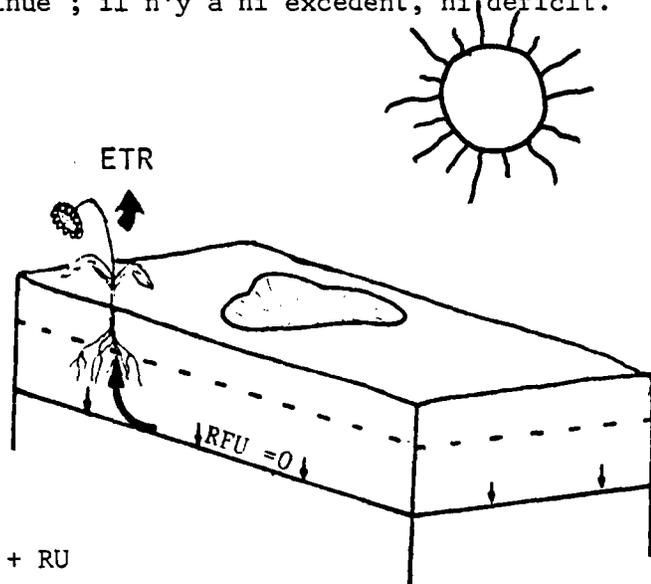
$$. P + RU > ETP$$



$$ETR = ETP$$

La réserve du sol diminue ; il n'y a ni excédent, ni déficit.

$$. P + RU < ETP$$



$$ETR = P + RU$$

La réserve du sol s'annule. La végétation manque d'eau, ce qui se traduit par un déficit agricole : $Déf = ETP - ETR$

ANNEXE V.2

INFLUENCE DU PAS DE TEMPS DU BILAN
SUR LES VALEURS MENSUELLES DE PLUIE EFFICACE

1. VALEURS OBTENUES A DOS D'ANE EN CONSIDERANT UNE RESERVE DE 100 MM

L'écart entre les pluies efficaces mensuelles à Dos d'Ane calculées respectivement par un bilan journalier et un bilan mensuel est majoritairement en faveur du premier cité, mais les écarts inverses n'en sont pas pour autant négligeables comme l'illustre le tableau ci-dessous.

ECARTS SUR LES VALEURS MENSUELLES - Bilan Mois - Bilan Jour

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	-9.8	-43.0	0.0	7.3	25.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-63.2	16.3
	-4.3	-29.6	52.5	-39.2	0.0	-11.2	0.0	39.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	-51.5	2.5	-10.2	-3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-21.7
	-30.5	30.0	-8.7	18.1	-1.9	-33.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-18.3
	-24.1	25.0	-33.3	3.5	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-5.8	-46.3	-18.2	30.9	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-24.6	-47.8	0.0	32.5	8.7	0.0	-16.3	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.4
	-13.5	-16.8	-55.5	62.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	-11.0	-11.3	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-77.0
	37.5	-7.5	16.5	-2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-93.5	0.0	47.0	-47.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-	9	7	6	4	2	2	1	0	0	0	1	4
0	1	1	2	0	8	9	10	10	11	11	10	6
+	1	3	3	7	2	0	0	1	0	0	0	1

La tendance générale de cet écart est de s'opposer au déséquilibre apparu précédemment. Ainsi les mois de janvier à mars sont majoritairement en faveur du bilan journalier, avril est le seul mois où, au contraire, le bilan mensuel donne des valeurs supérieures.

Chaque fois que le bilan mensuel donne des valeurs supérieures de pluie efficace, on s'aperçoit que cet écart est dû à la différence de saturation de la réserve en eau du sol. L'écart sur les pluies efficaces est inférieur ou égal à celui sur l'état de saturation de la réserve.

Mois	Ecart sur les pluies efficaces (mm)	Valeur de la réserve en eau du sol en début de mois		
		Bilan mensuel (mm)	Bilan journalier (mm)	Ecart (mm)
Avril 1971	7.3	54.5	11.5	43
Mai 1971	25.1	100	68	32
Décembre 1971	16.3	100	63.5	26.5
Mars 1972	52.4	100	47.6	52.4
Août 1972	39.4	74.7	24.3	50.4
Février 1973	2.5	100	94.3	5.7
Février 1974	30.	100	60.8	39.2
Avril 1974	18.1	100	81.7	18.3
Février 1975	25.	100	64.7	35.3
Avril 1975	3.5	100	56.4	43.6
Avril 1976	30.9	100	62.7	37.3
Avril 1977	32.5	94.9	47	47.9
Mai 1977	8.7	100	84.5	15.5
Avril 1978	62.5	100	29.8	70.2
Avril 1979	5.8	100	88.7	11.3
Janvier 1980	37.5	100	50.2	49.8
Mars 1980	16.5	100	80.5	19.5
Mars 1981	47	100	20.6	79.4

2. ESSAI D'EXPLICATION

Considérons un mois où les bilans mensuels et journaliers conduisent à des valeurs positives de pluie efficace. Nous avons alors :

- par bilan mensuel :

$$Peff_m = P_m - ETP_m - (RUMAX - RUDEF_m) ; (RU_{fin\ m} = RU_{max})$$

- par bilan journalier :

$$Peff_j = P_m - ETR_j - (RU_{fin\ j} - RU_{def\ j})$$

d'où l'écart $E = Peff_j - Peff_m$

$$\begin{aligned} E &= (RU_{max} - RU_{def_m}) - (RU_{fin_j} - RU_{del_j}) + ETP_m - ETR_j \\ &= \underbrace{(RU_{max} - RU_{fin_j})}_{E_F} + \underbrace{(RU_{del_j} - RU_{deb_m})}_{E_D} + \underbrace{ETP_m - ETR_j}_{Def} \end{aligned}$$

$$\underline{E_F = RU_{max} - RU_{fin_j}}$$

Celui-ci est toujours positif, il est d'autant plus grand qu'il n'y a pas de précipitations en fin de mois (assèchement partiel de la réserve en fin de mois par le bilan journalier).

$$\underline{ED = RU_{def_j} - RU_{def_m}}$$

Le signe de ce membre est par contre variable, fonction de la pluviométrie de (ou des) mois précédent(s) :

- si le mois précédent a eu une pluie efficace, alors $RU_{def_m} = RU_{max}$, ED est négatif, et d'autant plus qu'il n'y a pas de pluie en fin du mois précédent,
- si le mois précédent n'a pas eu de pluie efficace :
 - . s'il n'a pas plu du tout, dans les deux cas les réserves du mois n-2 sont amputées de la valeur de l'ETP mensuelle jusqu'à leur assèchement éventuel,
 - . si la pluie est cependant supérieure à l'ETP et assure ainsi une recharge partielle de la réserve, ED a d'autant plus de chance d'être positif que cette pluie tombe en fin de mois, mais là encore interviennent les valeurs de réserves à la fin du mois n-2.

$$\text{Def} = \text{ETP}_m - \text{ETR}_j$$

Ce membre est là encore toujours positif, il est d'autant plus grand que :

- la réserve maximale est faible (assèchement plus rapide),
- l'ETP est élevée par rapport à la pluviométrie et à la valeur de la réserve en début de mois,
- ETR_j est faible, c'est-à-dire que le nombre de jours où la pluviométrie et la réserve ne suffisent pas à satisfaire la demande représentée par ETP est élevée.

En général, réserve relativement dessaturée et pas de pluies : ceci concerne surtout les mois de transition entre saisons sèche et humide (ex : novembre 1971). Si la réserve est saturée ou que la pluie est abondante, en début de mois, alors la demande est toujours satisfaite : $\text{ETR}_j = \text{ETP}_m$.

Ces différentes observations peuvent être résumées dans le tableau suivant :

$$E = E_F \begin{matrix} \geq 0 \\ \rightarrow 0 \end{matrix} + \begin{matrix} > 0 \text{ ou} \\ < 0 \end{matrix} E_U + \begin{matrix} D_{\text{ef}} \\ \geq 0 \end{matrix}$$

positif	pas de pluie en fin de mois	peu de pluie le mois précédent, surtout concentré en fin de mois	pas de pluie et réserve désaturée en début de mois, réserve maximale faible	pluie irrégulière concentrée sur quelques jours (en milieu de mois)
négatif	pluie en fin de mois + accumulation de ce terme	précipitation efficace le mois précédent concentrée en début de mois pas de pluie en fin de mois précédent	pluie abondante ou réserve saturée en début de mois - forte réserve maximale + accumulation de ce terme	pluie homogène bien répartie sur tout le mois

Il paraît ainsi logique que le bilan journalier donne des valeurs supérieures de la pluie efficace que le bilan mensuel.

Cet exemple caricatural illustre ces propos.

Considérons 3 mois consécutifs (décembre - janvier - février) avec une ETP journalière de 3 mm, une réserve nulle début décembre, une pluie de 100 mm le 31 décembre, une pluie de 200 mm le 15 janvier, une pluviométrie homogène de 100 mm par jour en février :

	Pluie	ETP	Bilan Journalier				Bilan Mensuel				
			Réserve début	ETR	Réserve fin	Peff	Réserve début	ETR	Réserve fin	Peff	E
Décembre	100	93	0	3	97	0	0	93	7	0	0
Janvier (Le 15)	200	93	97	93	52	152	7	93	100	14	+ 138
Février	280	84	52	84	100	148	100	84	100	196	- 48

3. INFLUENCE DE L'ECHANTILLON DE PLUIES

Si l'on multiplie par 2 ou que l'on divise par 2 les hauteurs de pluies mensuelles relevées à Dos d'Ane, l'écart sur les pluies efficaces cumulé sur la période 1971-1981 reste du même ordre de grandeur : 400 mm. L'écart relatif est bien sûr beaucoup plus important sur l'échantillon réduit (P/2). Avec ces valeurs, on obtient de nombreuses égalités entre les deux bilans.

-9.9	-45.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	-70.7	24.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-31.8	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-54.8	11.9	-10.2	30.5	-1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	-9.5	-22.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-23.2	-51.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-31.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	-17.7	-4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-10.7
-30.3	0.0	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-44.3	0.0	0.0	-38.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

écart négatif	6	5	3	2	1	-	-	-	-	-	-	1	18
égalité	5	5	7	7	10	11	11	11	11	11	11	10	110
écart positif	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4

Inversement avec les pluies (P*2), les égalités sont beaucoup plus rares, et on assiste à une succession accrue d'écarts de signes inverses.

-9.8	-37.2	8.6	23.8	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-35.2	32.7
-16.2	-36.1	52.5	-39.2	21.4	-22.9	15.6	14.3	-25.1	0.0	0.0	-7.9	-19.8
10.3	1.8	-6.7	-42.5	26.7	23.7	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-15.7
5.3	3.5	-2.3	2.6	0.0	-35.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-40.4
-3.9	10.6	-35.1	42.5	-36.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-23.7
9.1	-13.8	-13.7	32.6	-4.5	-6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-46.5
22.0	-40.3	40.4	-15.4	11.2	0.0	-20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-8.5
1.3	-0.1	-70.1	62.5	0.0	0.0	2.1	-4.1	0.0	0.0	0.0	-9.5	-13.3
-6.1	19.4	-11.3	5.7	0.0	-3.8	0.0	-9.1	0.0	0.0	0.0	-31.1	-46.9
37.5	-6.1	15.1	-2.5	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4
-75.3	-25.9	49.9	-24.0	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-52.4

écart négatif	5	7	6	5	2	4	1	3	1	0	4	10	48
égalité	0	0	0	0	4	6	7	7	10	11	7	0	52
écart positif	6	4	5	6	5	1	3	1	0	0	0	1	32

ANNEXE V.3

REGRESSIONS LINEAIRES ENTRE LES PLUIES ET LES PLUIES EFFICACES

1. RELATIONS ETABLIES SUR LES VALEURS ANNUELLES DE L'ENSEMBLE DES 304
MAILLES

Années	Hauteur de pluie moyenne	Coefficient de la régression linéaire $P_{eff} = a B + b$	
		a	b
1971	2 099.3	0.8789	- 748.0
1972	3 632.9	0.99	-1011.5
1973	3 173.8	0.968	- 830.7
1974	2 602.3	0.9589	- 825.1
1975	2 667.5	0.936.3	- 781.6
1976	2 663.1	0.9455	- 839.1
1977	2 968.7	0.9472	- 799.4
1978	2 113.3	0.9017	- 761.4
1979	2 894.5	0.9614	- 968.3
1980	4 436.2	0.9535	- 703.
1981	2 603.5	0.9602	- 951.5
\bar{x} 1971-1981	2 875.5	0.9498	- 838.4

2. RELATIONS SUR LES MOYENNES MENSUELLES DES 304 MAILLES

	Hauteur moyenne		R	A	B	Nb de mailles retenues.
	Pluie	Pluie efficace				
Janvier	549.6	417.1	0.9975	1.0287	- 148.3	304
	--	--	--	--	--	304
Février	453.3	346.9	0.9979	1.0378	- 123.6	304
	--	--	--	--	--	304
Mars	390.5	291.8	0.998	1.0007	- 99.0	303
	<i>391.5</i>	<i>292.7</i>	--	<i>1.008</i>	- <i>99.1</i>	
Avril	330.1	243.	0.9978	1.0053	588.8	304
	--	--	--	--	--	
Mai	177.2	114.5	0.9964	0.9304	- 50.4	276
	<i>191.7</i>	<i>126.1</i>	<i>0.9973</i>	<i>0.944</i>	- <i>54.0</i>	
Juin	158.3	95.7	0.99	0.9297	- 51.5	265
	<i>175.2</i>	<i>109.8</i>	<i>0.9919</i>	<i>0.9474</i>	- <i>56.2</i>	
Juillet	164.6	107.	0.9911	0.9332	- 46.6	214
	<i>219.5</i>	<i>152.</i>	<i>0.9955</i>	<i>0.9905</i>	- <i>65.4</i>	
Août	160.4	103.6	0.9909	0.8782	- 37.2	250
	<i>189.3</i>	<i>126.</i>	<i>0.9925</i>	<i>0.9060</i>	- <i>45.5</i>	
Septembre	86.	32.1	0.9592	0.7059	- 28.6	164
	<i>134.</i>	<i>59.6</i>	<i>0.9753</i>	<i>0.8319</i>	- <i>51.9</i>	
Octobre	79.	21.	0.9372	0.6267	- 28.5	124
	<i>139.3</i>	<i>51.5</i>	<i>0.9743</i>	<i>0.8326</i>	- <i>64.5</i>	
Novembre	117.4	36.3	0.9634	0.7705	- 54.2	156
	<i>170.</i>	<i>70.7</i>	<i>0.9804</i>	<i>0.8921</i>	- <i>81.</i>	
Décembre	231.2	104.8	0.9851	0.9523	- 115.3	279
	<i>243.4</i>	<i>114.2</i>	<i>0.9868</i>	<i>0.9735</i>	- <i>122.7</i>	

En caractères italiques, les relations obtenues en ne considérant que les mailles de pluies efficaces non nulles.

On observe l'amélioration des différentes relations avec l'élimination des valeurs nulles de pluie efficace, gain d'autant plus sensible que le nombre de valeurs de pluie efficace nulle est élevé.

3. RELATIONS SUR LES 132 VALEURS MENSUELLES DE 1971-1981, POUR 19 MAILLES TEST DE LA REUNION

Excepté les mailles peu "pluvieuses" du littoral Nord (St-Denis) et de la côte sous le vent, les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.98 et même 0.99 dans toute la zone où $\bar{x}_P \geq 2,5$ m.

Dans ces zones de forte corrélation, A varie de 0.95 à 1, B varie de -70 à -110.

Dans la quasi-totalité des cas, S_x et S_y sont du même ordre de grandeur.

Les deux plus mauvais coefficients de corrélation correspondent aux régions de très faible pluie efficace, module moyen interannuel de Peff de l'ordre de 10 mm. En fait seulement, une dizaine de mois connaissent une pluie efficace non nulle. Dans ces cas-là, A et B sont de l'ordre de 0.5 et -30.

Les valeurs intermédiaires des coefficients de corrélation ($R = 0.9$ à 0.95) correspondent à des valeurs intermédiaires de A et B, soit environ 0.8 et -50.

On note une correspondance des variations entre les trois grandeurs R, A et $|B|$

$$R \nearrow - A \nearrow \text{ et } |B| \nearrow$$

On passe ainsi d'une relation de pourcentage constant (B négligeable) (pour R faible) à une relation de différence constante ($A \approx 1$) entre P et Peff pour R élevé.

En général, les résultats sont meilleurs sur les valeurs annuelles et moins bons sur les valeurs moyennes mensuelles, sauf aux mailles 99, 122 et 150.

Si on enlève toutes les valeurs nulles de Peff, on constate une convergence des différentes régressions linéaires autour de la relation approchée : $P_{eff}_m = P_m - 100$ mm.

REGRESSIONS LINEAIRES Peff = f(P) sur 19 mailles-test de l'île de La Réunion,
pour 132 valeurs mensuelles, 11 valeurs annuelles, 12 valeurs moyennes mensuelles.

		13	32	43	59	67	91	99	112	122	144	150	174	183	208	217	248	270	285	300
132 mois	\bar{x}_P	124.4	63.5	139.4	126.1	178.6	150.5	79.2	211.3	137.8	263.3	148.3	176.	260.8	282.8	579.	424.1	294.	325.	502.3
	R	95.4	82.1	97.9	96.8	98.9	98.6	83.4	98.5	98.1	99.4	93.5	98.9	98.9	98.8	99.9	99.9	99.2	98.9	99.6
	A	.835	.533	.906	.878	.951	.936	.524	.935	.921	.973	.772	.950	.964	.964	.997	.991	.985	1.001	1.014
	B	-54.4	-25.9	-49.4	-50.9	-64.4	-50.5	-31.	-75.6	-57.7	-79.7	-61.3	-69.4	-91.7	-91.7	-83.7	-66.8	-86.2	-104.1	-111.2
11 années	\bar{x}_P	1468.8	763.3	1672.5	1512.7	2143.8	1806.5	951.	2535.9	1637.7	3160.1	1780.1	2112.3	3129.	3386.3	6951.8	5089.3	3528.2	3899.7	6028.
	R	98.	98.8	98.3	99.6	99.1	75.4	99.7	98.7	99.7	96.1	99.5	99.7	98.7	99.9	99.9	99.9	99.9	99.5	99.8
	A	1.066	.991	1.057	1.099	1.006	1.050	.528	1.059	1.035	1.014	1.022	1.033	1.014	.976	1.005	1.003	1.025	1.016	1.030
	B	-992.8	-659.8	-846.3	-945.2	-888.8	-812.6	-375.1	-1221.1	-881.6	-1085.5	-1180.8	-1009.1	-1136.2	-1139.7	-1060.5	-859.8	-1176.7	-1306.8	-1430.7
12 x mois	R	94.5	81.0	97.7	96.8	98.9	98.6	88.4	98.6	99.0	99.4	96.7	98.7	99.2	98.4	99.9	99.8	99.3	98.4	99.3
	A	.678	.274	.805	.713	.837	.812	.338	.867	.767	.908	.583	.840	.887	.894	.984	.965	.954	.973	.989
	B	-35.3	-9.3	-35.3	-30.1	-50.3	-31.8	-16.2	-61.2	-36.5	-62.7	-33.3	-50.1	-61.4	-72.	-76.3	-55.6	-77.	-94.9	-98.5

6me PARTIE

LES MODELES GLOBAUX DE SIMULATION
DES BASSINS HYDROLOGIQUES

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE
QUELQUES BASSINS VERSANTS DE LA REUNION

Dans la quatrième partie, nous avons montré que les modèles globaux de simulation des bassins hydrologiques nous permettaient de vérifier les résultats de nos approches préalables sur les facteurs climatiques, pluie et ETP. Nous nous étions surtout intéressés à la fonction production de ces modèles (cf § 1 du chapitre 4), c'est-à-dire au bilan d'eau au sol.

Maintenant nous allons étudier le transfert de l'eau à travers les différents réservoirs du modèle, la prépondérance de tel ou tel type d'écoulement selon les bassins en relation avec leur géologie, leur morphologie.

Nous avons également évoqué précédemment les transferts d'eau souterraine entre bassins, les problèmes de pertes. Nous y reviendrons en essayant de quantifier les volumes d'eau échappant au contrôle dans les rivières qui participent aux sous-écoulements souterrains.

Nous nous intéresserons un peu plus particulièrement au petit bassin de Dos d'Ane qui représente le secteur "sous le vent" de l'île. Nous y montrerons une nouvelle application des modèles globaux utilisés : la reconstitution de séries de débit permettant l'approche de certaines valeurs caractéristiques. Les deux années d'enregistrements journaliers communs des hauteurs de pluies et de débits nous permettront d'appliquer un modèle global un peu plus complexe dont nous comparerons les résultats avec celui à pas de temps mensuel. L'étude conjointe des débits de la ravine et du niveau piézométrique de la petite nappe superficielle nous permettra d'établir une éventuelle relation entre ces valeurs.

1. ETUDE MENSUELLE DE LA RELATION PLUIE-DEBIT SUR DIFFERENTS BASSINS

1.1. Les différentes composantes de l'écoulement intervenant dans le modèle GARDENIA

Nous avons vu dans la quatrième partie que différents réservoirs interviennent pour simuler le fonctionnement hydrologique d'un bassin. Nous ne reviendrons pas sur le rôle de cette première réserve qui intervient au niveau du bilan d'eau au sol, et ne considérerons maintenant que le transfert de la pluie efficace dans les différents réservoirs sous-jacents.

Au niveau du réservoir H (fig. VI.1), il y a deux exutoires :

- l'un pour l'écoulement rapide ; ce n'est pas le ruissellement sensu stricto ;
- l'autre qui permet l'alimentation des réservoirs profonds G1 (et G2) par infiltration,

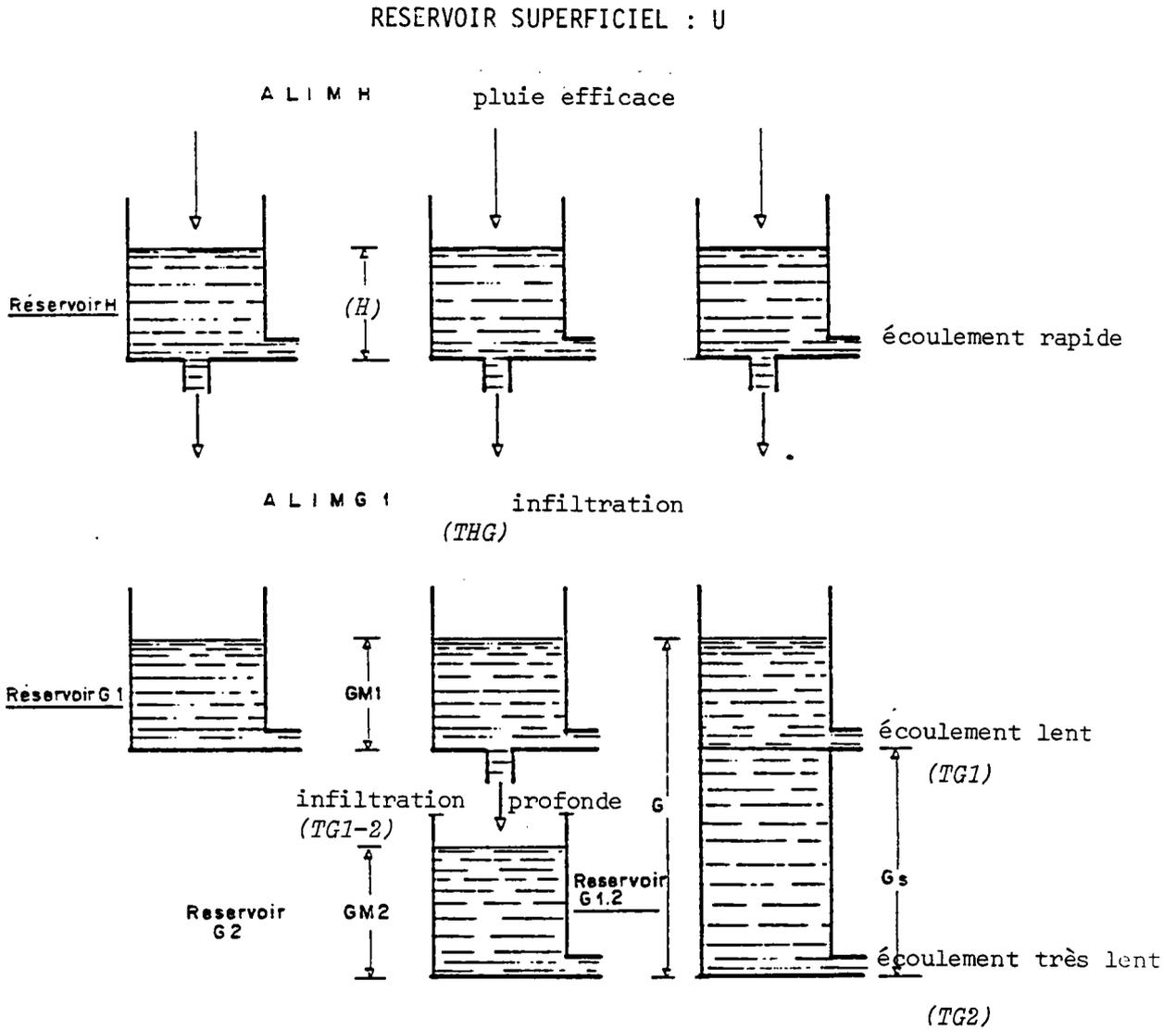
le temps de demi-transfert entre ces réservoirs est noté THG.

Le paramètre du modèle H (hauteur d'égale répartition entre écoulement rapide et percolation) permet de privilégier tel ou tel type d'écoulement. En imposant à H une très forte valeur, on réduit l'influence des écoulements rapides, on les favorise au contraire par une très faible valeur de H.

Le réservoir G1 est alimenté par le réservoir H (infiltration), il produit l'écoulement lent et alimente éventuellement le réservoir G2 par infiltration profonde. Les constantes de temps relatives à ces écoulements sont notés respectivement TG1 et TG12.

Le réservoir G2 produit l'écoulement très lent avec un demi-temps de tarissement TG2, les réservoirs G1 et G2 peuvent être unis en un seul (obligatoire pour simuler des niveaux), un seuil détermine alors la présence de l'écoulement lent (fig. VI.1). On peut sur option considérer que cet écoulement très lent s'infiltrer vers des horizons plus profonds et n'est pas mesurés à l'exutoire.

Selon le nombre de réservoirs, on fait intervenir deux ou trois composantes de l'écoulement. Au plan pratique, nous avons considéré d'abord qu'un seul réservoir sur les différents bassins et ensuite étudier l'intérêt d'en prendre un deuxième en considération.



(H) : paramètres du modèle

FIG. VI.1 - Les composantes de l'écoulement du modèle GARDENIA
les différentes possibilités de schématiser les
écoulements souterrains

1.2. Importance relative des composantes de l'écoulement sur les différents bassins

1.2.1. Rivière Langevin

Deux ajustements de qualité équivalente ont été obtenus en considérant d'une part un seul réservoir souterrain, d'autre part deux réservoirs souterrains, mais en limitant le plus possible l'écoulement rapide.

Surface estimée	Coefficient d'ajustement pondéré	Coefficient d'ajustement	H	THG	TG1	TG1.2	TG2
19.36	0.875	0.894	2104	2.2	5.7		
19.38	0.875	0.893	9999	0.9	3.6	0.6	6.2

Dans les deux cas, on observe (tableau VI.1) que la majorité de l'écoulement est apporté par le réservoir le plus profond (environ les 3/4), qui présente un temps de demi-tarissement de l'ordre de 6 mois.

TABLEAU VI.1 - Bilan hydrologique de la rivière Langevin calculé par modèle global de simulation, prise en compte de 1, puis 2 réservoirs souterrains - Période 1971-1981- valeurs en mm

Année	Pluie	ETP	ETR	P.eff	Q cal	Q obs	1 réservoir		2 réservoirs		
							Q rap	Qlent	Q rap	Qlent	Q T.lent
1971	2643.	1190.	1190.	1517.	1948.	2080.	199.	1749.	37.	327.	1579.
1972	5376.	1086.	1086.	4225.	3358.	3641.	968.	2390.	219.	825.	2298.
1973	4939.	1136.	1022.	4013.	4177.	5237.	1111.	3065.	249.	852.	3006.
1974	2597.	978.	978.	1615.	2175.	2333.	201.	1974.	35.	339.	1864.
1975	4208.	1094.	1094.	3022.	2713.	2763.	12.	2101.	136.	599.	1987.
1976	3341.	1144.	1144.	2197.	2306.	2305.	353.	1953.	66.	456.	1799.
1977	4376.	1146.	1146.	3232.	3318.	3470.	833.	2485.	193.	680.	2382.
1978	2556.	1183.	1183.	1432.	1786.	2128.	173.	1613.	32.	299.	1490.
1979	4684.	1185.	1185.	3438.	2797.	2668.	695.	2103.	157.	680.	1990.
1980	6475.	1188.	1160.	5460.	5324.		1986.	3338.	634.	1060.	3467.
1981	3617.	1136.	1136.	2370.	2588.		366.	2223.	70.	472.	2166.
X 71-81	4073.	1133.	1120.	2953.	2953.		681.	2272.	166.	599.	2184.

Ces débits souterrains permettent de soutenir la rivière Langevin à l'étiage (débits minimums mensuels rarement inférieurs à 1 m³/s). La prépondérance de cet écoulement souterrain est également illustrée par la faible amplitude de variation de ces débits mensuels :

- 1 à 5 sur les valeurs observées,
- 1 à 8 ou 10 si l'on considère la valeur de janvier 1980 calculée par modèle.

Il y a également une très faible relation entre la pluie mensuelle sur le bassin et les débits correspondants ($r < 0.6$).

Les débits d'écoulement des réservoirs profonds étant relativement constants d'une année à l'autre, la proportion de l'écoulement rapide est d'autant plus élevée que l'écoulement total, tout de même lié à la hauteur de pluie, est important. Dans le cas où un seul réservoir est considéré, le rapport de l'écoulement rapide sur l'écoulement lent passe de 0.1 en 1971 à 0.6 en 1980, c'est un phénomène surtout notable à l'échelle mensuelle puisque, au niveau des mois très pluvieux ayant occasionné des crues, l'écoulement rapide dépasse largement l'écoulement lent (5 fois supérieur en janvier 1980).

La version considérant deux réservoirs présente les mêmes "défaillances" (mêmes mois mal reconstitués) que la version à un réservoir (fig. VI.2) (années 1973, 1978 et fin 1979). Il est dommage que l'année 1980 n'ait pu être prise en compte, les débits maximums de janvier 1980 auraient peut-être permis de trancher entre ces deux simulations.

Dans les deux cas, le débit souterrain est très important et c'est là le point essentiel à rappeler. Ceci est conforme avec l'absence de trace de ruissellement sur l'amont du bassin et la nature géologique des terrains (formations volcaniques récentes projections, coulées scoriacées, coulées démantelées (Plaine des Sables), accumulation de formation détritique en piémont de falaise) (fig. VI.3).

L'essentiel de la recharge des nappes souterraines a lieu pendant les 4 mois de janvier à avril (infiltration cumulée moyenne supérieure à 1500 mm), cette infiltration se maintient supérieure à 150 mm pendant les 4 mois suivants, mais devient quasi-nulle en fin d'année, surtout en octobre.

FIG. VI.2 - Simulation des débits sur la riv. Langevin
 A) 1 réservoir
 B) 2 réservoirs
 (période 1971-79)

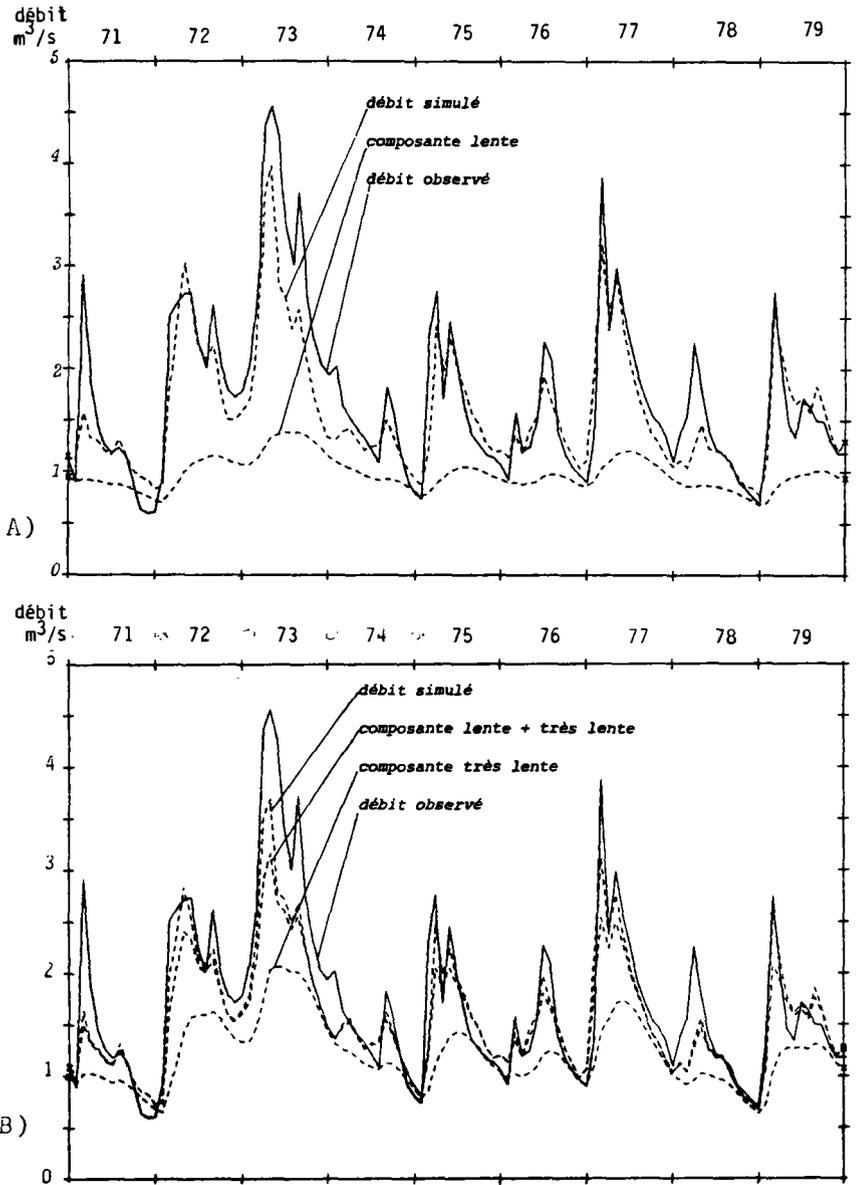
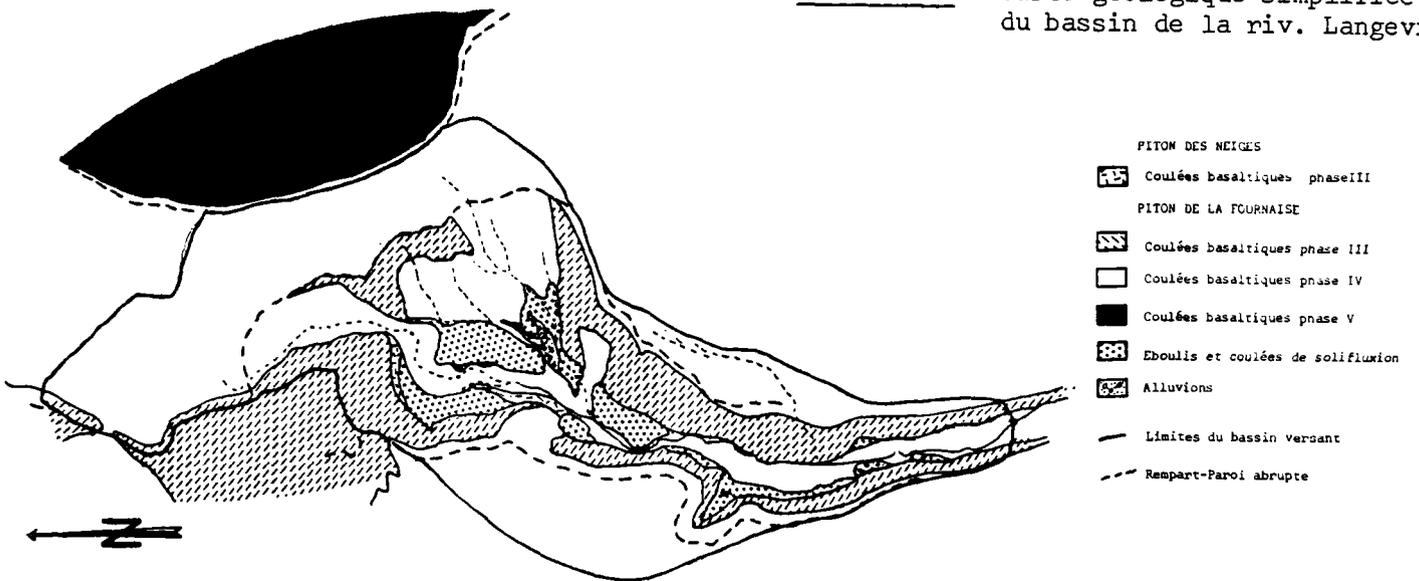


FIG. VI.3 - Carte géologique simplifiée du bassin de la riv. Langevin



1.2.2. Rivière des Marsouins

Le meilleur ajustement a été obtenu en faisant intervenir un réservoir souterrain unique qui assure l'essentiel des débits (75 % sur la période 1971-1981 - Tableau VI.2).

Nous avons effectué un essai avec deux réservoirs qui n'amélioraient pas l'ajustement (fig. VI.4). Les temps de tarissement des deux réservoirs étaient équivalents (≈ 8 mois) et le débit global souterrain n'évoluait pratiquement pas entre ces deux essais. Le cas à deux réservoirs revenait à considérer un débit très important dû au réservoir le plus profond assez stable entre 2.5 et 4 m^3/s , le réservoir supérieur étant beaucoup plus variable (1 à 2 m^3/s en saison des pluies à presque nul en fin de saison sèche).

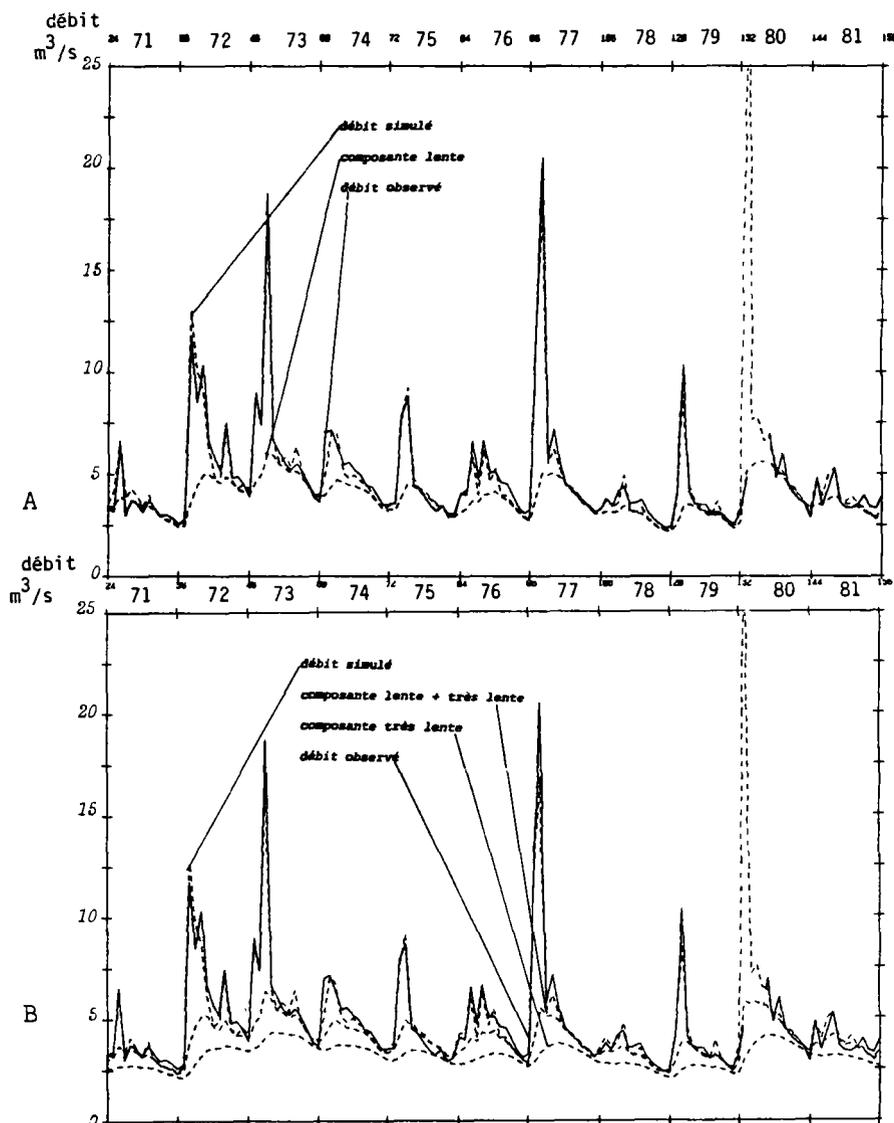


FIG. VI.4 - Simulation des débits de la rivière des Marsouins, 1971-1981
 A - avec un seul réservoir souterrain
 B - avec deux réservoirs souterrains

Dans le cas à un seul réservoir, le débit souterrain suit ces variations cumulées. Il assure le débit d'étiage en octobre-novembre, parfois décembre, de l'ordre de 2.5 m³/s. En période de crue, comme par exemple suite au cyclone Hyacinthe en janvier 1980, il n'excède guère les 5 m³/s.

Assez constant non seulement d'une année sur l'autre, mais aussi d'un mois à l'autre, ce débit souterrain semble posséder de très importantes réserves. Le modèle estime que ce réservoir possède une hauteur d'eau équivalente à près de 2 m en moyenne en décembre, soit 10⁸ m³ environ.

Tout comme la rivière Langevin, l'écoulement rapide n'intervient de façon notable que pendant la saison des pluies. Les 3 m écoulés en janvier 1980 sont nettement supérieurs aux autres totaux annuels de la période étudiée (7 valeurs inférieures à 1 m). En moyenne cet écoulement rapide est insignifiant 6 mois de l'année (tableau VI.2).

Années	Hauteur de Pluie	Débit Observé	Débit Calculé	Composante rapide	Nb Mois où Qrap < 10mm	Composante lente	Etude des réservoirs en décembre			Observations
							sol	réservoir H	réservoir G	
1971	3441	2760	2944	337	7	2607	54	9	1602	
1972	7174	5075	5024	1604	3	3422	"	45	2637	
1973	6254	5387	5374	1420	4	3954	"	38	2531	1 fois RU = 0 (assèchement de la réserve en eau du sol)
1974	4422	4078	3820	555	3	3265	"	44	2130	
1975	4638	3508	3630	714	7	2919	"	80	2051	1 fois RU = 0 (id.)
1976	4090	3655	3349	506	5	2841	"	18	1801	1 fois RU = 0 (id.)
1977	6240	5164	4887	1493	6	3294	"	47	2003	
1978	3032	2660	2524	231	7	2293	"	25	1439	1 fois RU = 0 (id.)
1979	4454	3105	3025	653	6	2372	"	84	1727	1 fois RU = 0 (id.)
1980	8868		7382	3590	6	3791	"	2	2167	3131. mm de Qrap en Janvier
1981	3959		3083	371	5	2711	"	58	1895	
Moyenne	5143		4094.8	1042.2		3042.6				

Toutes les données sont en mm.

Simulation obtenue avec les paramètres : P = 24 % - RU = 54 mm - ETP = 20 % - H = 1486 mm - THG = 0.45 mois - TG1 = 7,2.

TABLEAU VI.2 - Bilan des écoulements sur la rivière des Marsouins, simulés par un modèle global à réservoir (période 1971-1981)

Les principaux paramètres du modèle commandant cette répartition des débits sont estimés assez précisément lors de l'ajustement :

- H = 1200 à 1500 mm
- THG = 0.5 mois
- TG1 = 7.5 mois

Nous avons effectué une petite étude de sensibilité sur ces trois paramètres dont les principaux résultats sont repris dans le tableau VI.3.

H RUI = Per	1230	100*	500*	2000*	1122	1399	1201	1201*	1201*
T H G	0.51	0.1	0.1	0.5	0.1*	2*	5*	18.8	1.1
T G 1	7.7	100	10	6.50	6.9	10.8	21.1	1*	20*
Coeff. d'ajustement	0.98	0.55	0.92	0.95	0.97	0.95	0.89	0.74	0.96

* Paramètres imposés

Remarque. Les coefficients correcteurs de Pluie et ETP sont fixés à 0, la réserve du sol à 50 mm.

TABLEAU VI.3 - Pertes de la qualité de l'ajustement en imposant la valeur d'un des paramètres H, THG ou TG1

Si l'on fixe arbitrairement un paramètre à une valeur différente de la valeur optimum (optimisée par le modèle), on note une dégradation assez sensible de l'ajustement surtout sur un sens de variation : la perte de qualité est plus manifeste si l'on réduit H ou TG2, que si on les augmente et inversement pour THG.

La rivière des Marsouins est également jaugée légèrement en amont, à l'ilet Banane ; les meilleurs ajustements aboutissent à une définition très proche de ces différents paramètres :

H = 1700 à 1800 - THG = 0.4 mois - TG1 = 7.5 à 8 mois

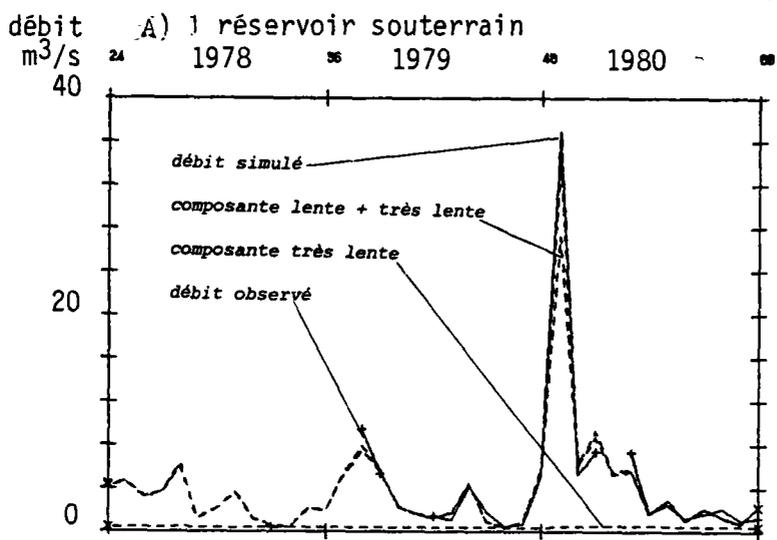
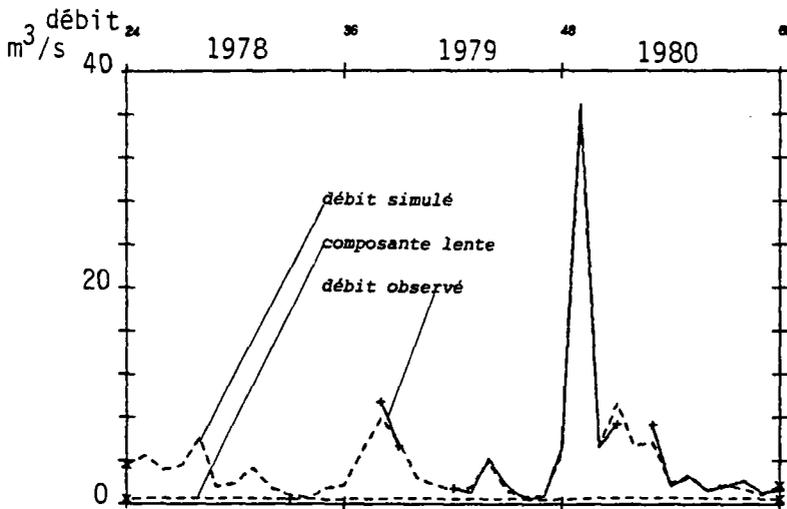
Les formations géologiques affleurantes sur l'amont du bassin, coulées récentes du Piton des Neiges, sont très perméables (voir 4ème partie et fig.VI.7). Les eaux s'infiltrent sur la plaine des Marsouins (bassins versants de la rivière des Marsouins et de ses affluents Bras Cabot et Bras Patience) sont en majorité captées par le paléoréseau hydrographique de la rivière des Marsouins qui recoupe le réseau actuel juste à l'amont des points de jaugeage. Ce sont ces eaux, transitant par le sous-

sol de la plaine des Marsouins qui assurent les débits d'étiage de cette ravine (assez exceptionnel à La Réunion) et la majeure partie du débit tout au long de l'année (excepté pendant les fortes crues).

L'essentiel de la recharge de ce réservoir souterrain est assuré par les quatre mois de janvier à avril.

1.2.3. Les autres bassins de la côte est

Le nombre réduit de valeurs de débits observés limite la signification des ajustements réalisés sur ces bassins, et nous n'y avons pas multiplié les essais. Les quelques simulations réalisées sur la rivière des Roches (fig. VI.5) témoignent de la difficulté de définir précisément les différents paramètres.

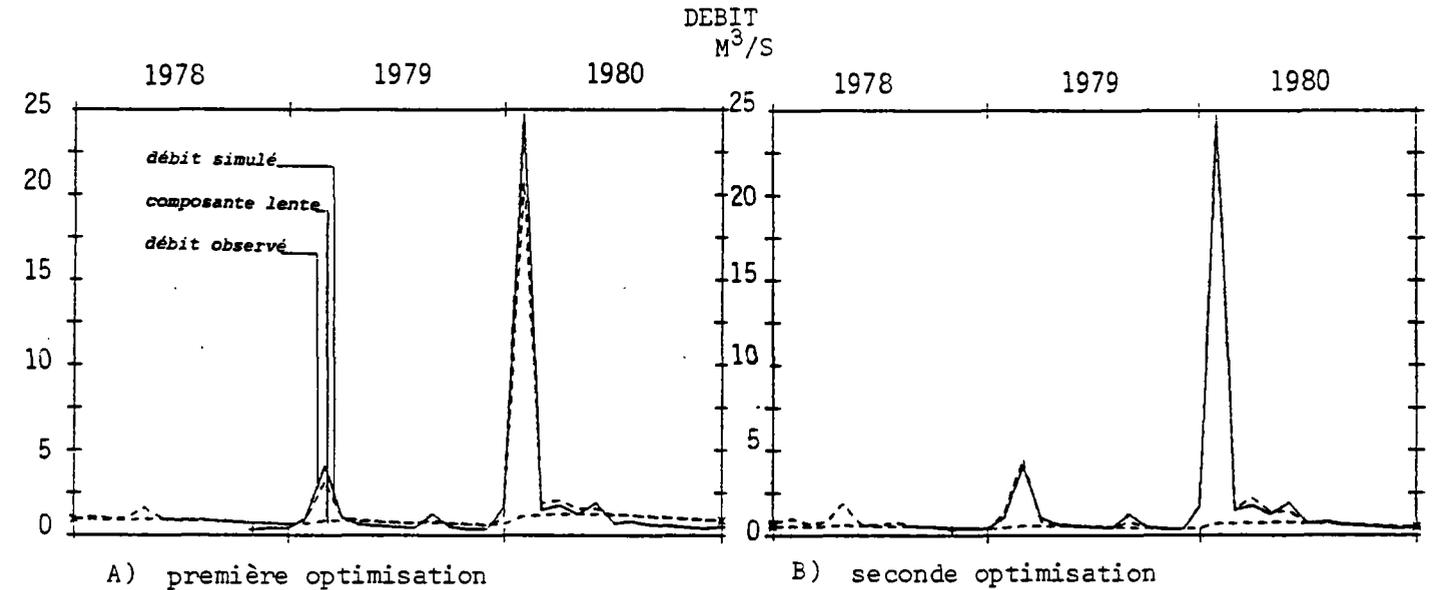


B) 2 réservoirs souterrains
limitation de l'écoulement superficiel

	A	B
Surf.	23.2	23.5
R _{pond.}	0.985	0.973
R _{nat}	0.995	0.990
% P	0	0
RU	44	44
% ETP	- 5	- 5
H	78	9999
THG	3.9	0.2
TC 1	6.9	0.4
TG 1-2	-	5.8
TG 2	-	20

FIG. VI.5 - Exemples de simulations très voisines sur la rivière des Roches, avec différentes combinaisons de paramètres

Par contre, certaines combinaisons donnent manifestement des résultats moins bons que d'autres, tels que sur la figure VI.6 pour le bras de Caverne.



	SURF.	R_{pond}	$R_{nat.}$	% P	RU	% ETP	H	THG	TG 1
A	18	0.950	0.982	0	150	0	696	0.5	12.00
B	20.4	0.993	0.999	5	1	10	194	0.6	8.6

FIG. VI.6 - Simulation réalisée sur le bras de Caverne

Les meilleurs ajustements observés sur les différentes rivières sont repris dans le tableau VI.4. Bien que la comparaison des différentes composantes des débits ne portent que sur trois ans, on note l'opposition entre la rivière des Marsouins et les autres rivières où la prépondérance de l'écoulement rapide est quasi-générale, même pour l'année 1978 peu pluvieuse.

Sur ces différentes rivières, on note effectivement que le paramètre H représentant la hauteur d'égale répartition entre ruissellement et percolation est beaucoup plus faible que sur la rivière des Marsouins (quelques centaines de mm).

Cours d'eau	Hauteur de Pluie	UN SEUL RESERVOIR Lame d'eau écoulée		Paramètres du modèle										DEUX RESERVOIRS Lame d'eau écoulée		
		Composante rapide	Composante lente	Coeff. Ajust.	Coeff. correct. Pluie	Réserve du sol	Coeff. correct. ETP	Hauteur tel. que RUI=PER	THG	TG1	TG1.2	TG2	Superficie calculée	Composante rapide	Composante lente	Composante très lente
Rivière des Marsouins	2249	97	1788											15	353	1553
	3407	343	1783	0.99	0	117	10	1702	0.41	7.76			45.2	63	688	1488
	6860	2363	3061	<i>0.98</i>				<i>9999</i>	<i>0.16</i>	<i>1.96</i>	<i>0.54</i>	<i>8.92</i>	<i>47.5</i>	734	1507	2890
Bras Cabot	2714	908	930											26	1232	812
	3903	1849	923	0.94	-5	87	10	108	0.67	7.43			12.8	85	2076	709
	7686	5443	1164	<i>0.89</i>				<i>9999</i>	<i>0.28</i>	<i>0.21</i>	<i>1.8</i>	<i>11.4</i>	<i>11.6</i>	844	4367	1114
Rivière des Roches	4324	2772	663											75	2872	552
	5264	3559	642	0.99	0	44	-5	78	3.9	6.9			23.1	134	3631	518
	9381	7645	770	<i>0.99</i>				<i>9999</i>	<i>0.18</i>	<i>0.40</i>	<i>5.8</i>	<i>20</i>	<i>23.5</i>	886	6623	655
Grand Bras	4978	2779	1138											113	3517	253
	5918	3486	1237	0.99	-5	49	10	173	2.4	0.15			5.5	182	4276	304
	10343	7731	1576	<i>0.98</i>				<i>9999</i>	<i>0.32</i>	<i>0.25</i>	<i>10</i>	<i>0.25</i>	<i>5.4</i>	1041	7672	551
Bras des Lianes	4682	2463	1283											103	3317	420
	6030	3618	1492	0.99	50	40	-10	135	1.	0.5			16.7	208	4454	387
	11218	8973	1806	<i>0.99</i>				<i>9999</i>	<i>0.25</i>	<i>0.06</i>	<i>7.2</i>	<i>8.2</i>	<i>17.</i>	1469	8070	635
Bras de Caverne	1848	361	915											11	661	640
	2840	986	838	0.99	5	1	10	194	0.56	8.63			17.9	45	1219	561
	6059	3972	1174	<i>0.99</i>				<i>9999</i>	<i>0.06</i>	<i>0.55</i>	<i>2</i>	<i>20</i>	<i>19.1</i>	651	3235	838
Bras de Cilaos	1799	509	687											14	666	648
	2829	1133	709	0.96	10	7	-10	218	1.7	5.08			102.4	61	1240	591
	6177	6502	1088	<i>0.96</i>				<i>999</i>	<i>0.32</i>	<i>0.95</i>	<i>2.2</i>	<i>13.7</i>	<i>99.3</i>	767	3138	930

TABLEAU VI.4 - Décomposition de l'écoulement sur les bassins versants de la côte Est de La Réunion pour les meilleurs ajustements obtenus en considérant respectivement un seul réservoir ou deux (en italique) - Années 1978, 1979 et 1980

Si l'on veut limiter cette proportion d'écoulement rapide en fixant le paramètre H à une très forte valeur (9999 mm), on s'aperçoit que les demi-temps de transfert THG et TGI régissant le mouvement de l'eau dans le premier réservoir sont excessivement réduits -la plupart de ces valeurs cumulées n'atteignent pas le demi-mois- indiquant des réservoirs superficiels alimentés et se vidangeant très rapidement (rétention de l'eau , quelques jours seulement).

Nous remarquons notamment que la rivière des Roches, le Grand Bras et le Bras des Lianes ne semblent pas disposer de réserves souterraines importantes : leur débit d'étiage est très faible, la proportion d'écoulement rapide est toujours nettement supérieure à celle de l'écoulement lent (tableau VI.4 et fig. VI.8). Leur bassin versant est essentiellement constitué des phases anciennes du Piton des Neiges (fig. VI.7) plus ou moins altérées et nettement plus imperméables que les phases récentes qui affleurent sur la plaine des Marsouins.

Au niveau du Bras Cabot, on retrouve pour les paramètres THG et TGI des valeurs du même ordre que sur la rivière des Marsouins ; c'est la faiblesse relative du paramètre H qui détermine la différence entre ces bassins, une partie de l'eau s'infiltrant au niveau du Bras Cabot alimente la rivière des Marsouins et non cet affluent. La proportion d'eau souterraine y est donc réduite ; elle peut cependant, en année déficitaire, être du même ordre que l'écoulement rapide.

On observe le même phénomène sur le Bras de Caverne pour des paramètres assez proches. Les formations perméables du plateau de Bélouve (fig. VI.7) en retenant l'eau quelques mois permettent de maintenir les débits d'étiage de cette ravine à environ 500 l/s.

Pour la rivière du Mât, l'écoulement lent assure un débit de base moyen mensuel de 2 à 3 m³/s ; mais dans ce cas encore, l'écoulement rapide est en proportion dominante. Vers l'aval notamment, la rivière du Mât a tracé son lit dans les formations relativement imperméabilisées (fig. VI.7) des premières phases du Piton des Neiges qui collectent la majeure partie des eaux qui percolent dans les différentes formations remaniées sus-jacentes qui sont au contraire assez perméables et constituent "le" réservoir assurant les débits d'étiages. Il s'agit plus certainement de la vidange cumulée de différents petits réservoirs disséminés dans l'ensemble du cirque de Salazie, que d'un seul tel que le détermine le modèle global.

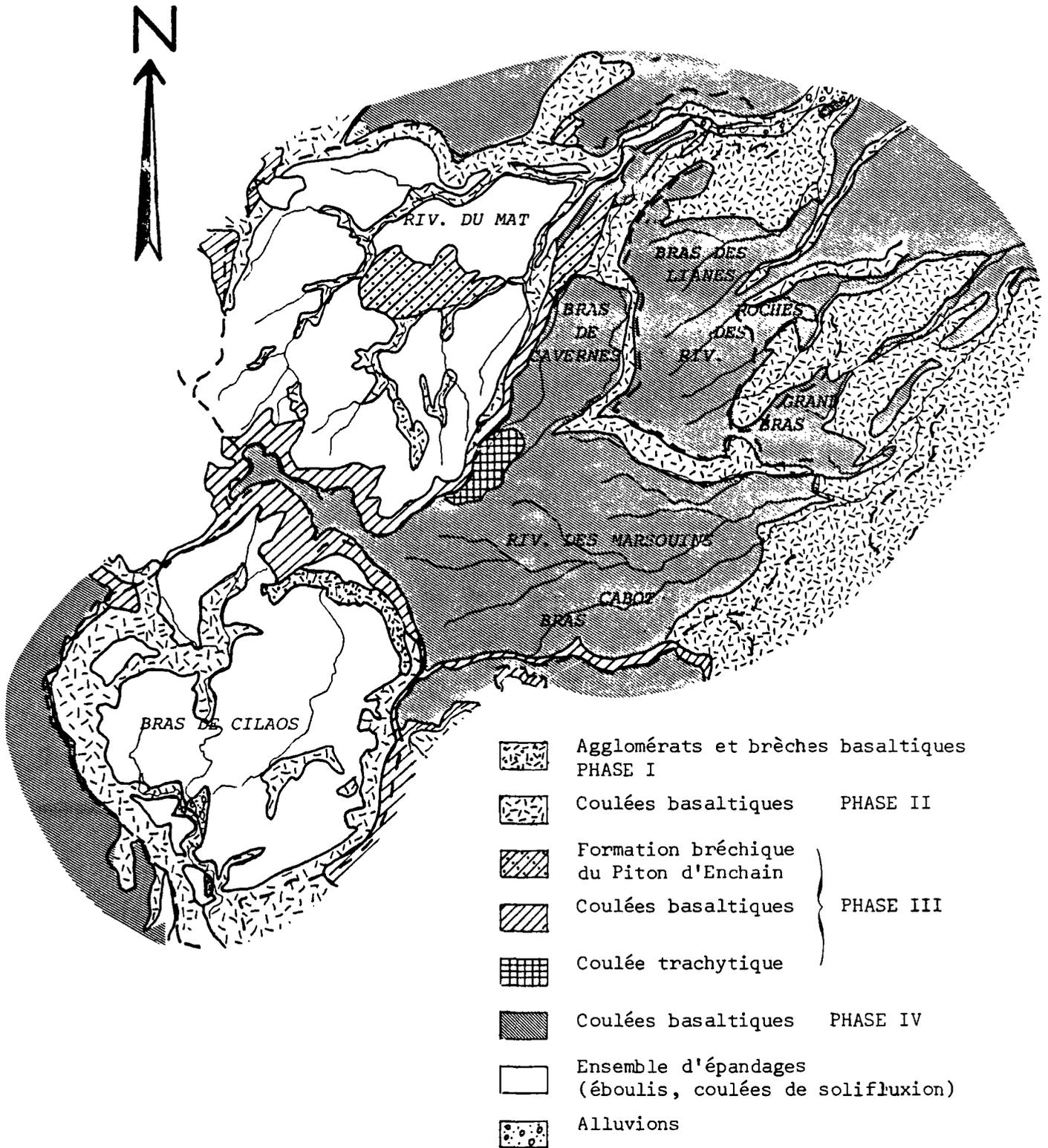
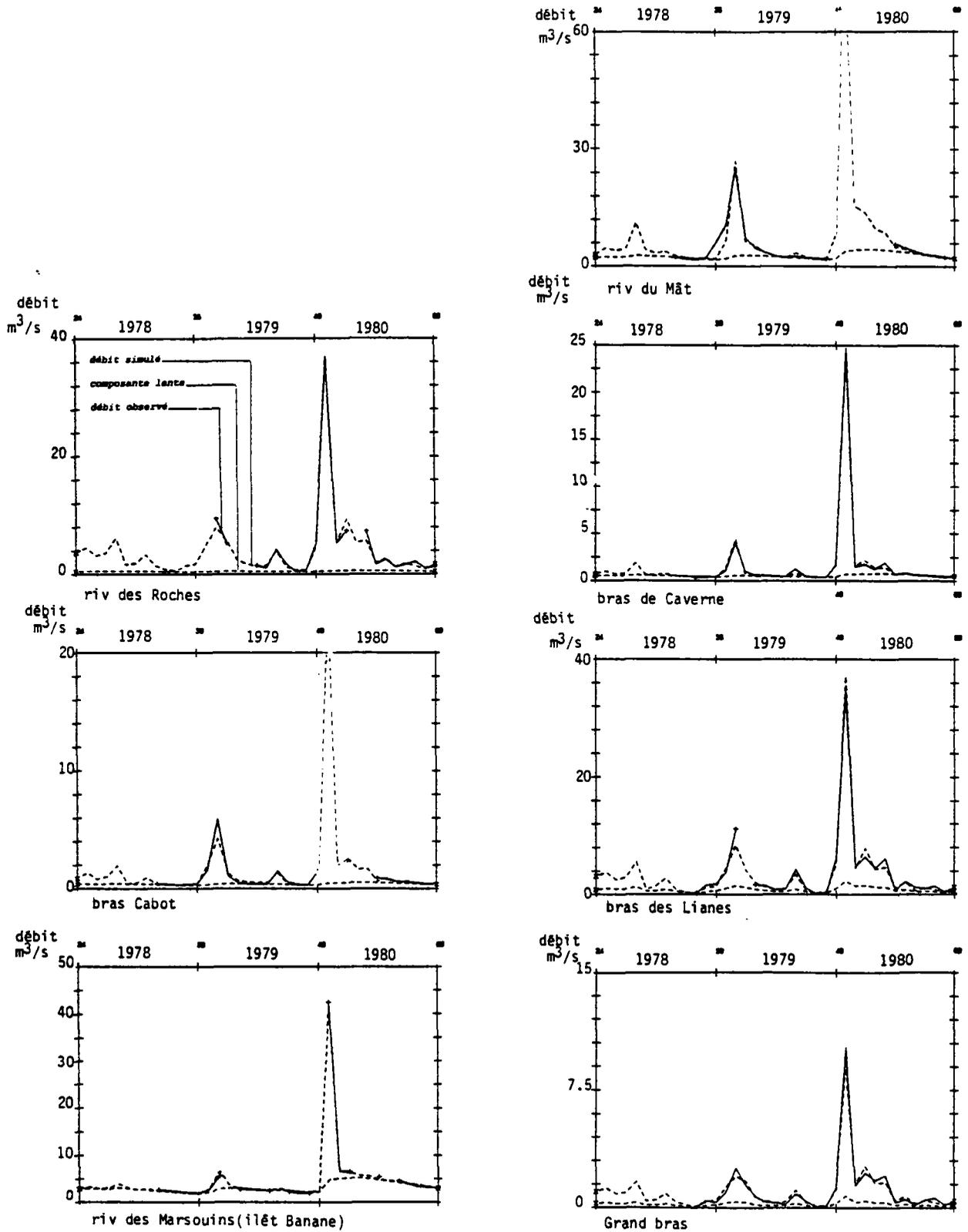


FIG. VI•7 - Carte géologique simplifiée des bassins de la côte Est et de la zone centrale de l'île - inspirée de la carte géologique de La Réunion BILLARD (1974).

FIG. VI-8 - Simulation des débits mensuels sur les bassins de la côte Est (1978 - 1980).



1.2.4. Bras de Cilaos

Nous retrouvons le même phénomène à Cilaos que dans Salazie, les deux cirques ont grossièrement la même structure géologique. Abrité par la chaîne du Piton des Neiges, le cirque de Cilaos reçoit moins d'eau, les débits y sont plus faibles (environ $1 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'étiage). Les débits de crue n'ayant pas été enregistrés, il n'est pas possible de bien vérifier les simulations réalisées qui supposent là aussi une forte proportion d'écoulement rapide pendant les mois pluvieux. Les débits de base assez constants sont simulés par un réservoir présentant un temps de tarissement très long d'environ un an (fig. VI.9).

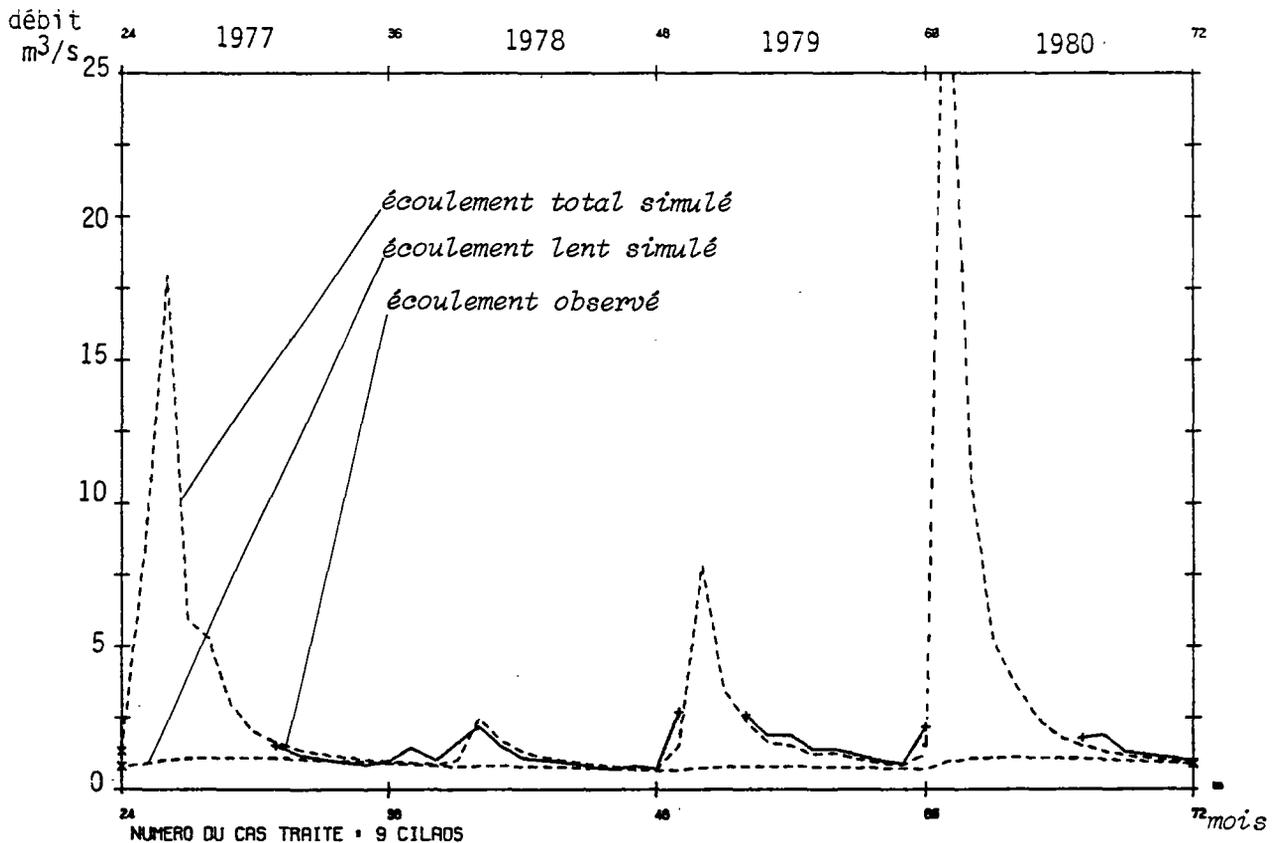


FIG. VI.9

Simulation des débits mensuels sur le Bras de Cilaos (1977 - 1980)

1.2.5. Ravine à Marquet

Nous reviendrons plus longuement sur cette rivière dans le chapitre suivant, mais citons rapidement les résultats concernant la répartition des différentes composantes de l'écoulement.

Le meilleur ajustement est obtenu en faisant intervenir deux réservoirs (fig. VI.10 B). Avec un seul réservoir, le modèle ne peut soutenir les débits d'étiages (fig. VI.10 A). Contrairement au cas observé sur la rivière des Marsouins, ce second réservoir garde un rôle mineur dans la proportion des débits, il assure simplement les débits de fins d'années : ses temps de transfert TG1.2 et TG2 suffisamment longs (tableau VI.5) lui permettent d'assurer ce rôle malgré de faibles réserves (hauteur d'eau emmagasinée inférieure à 100 mm).

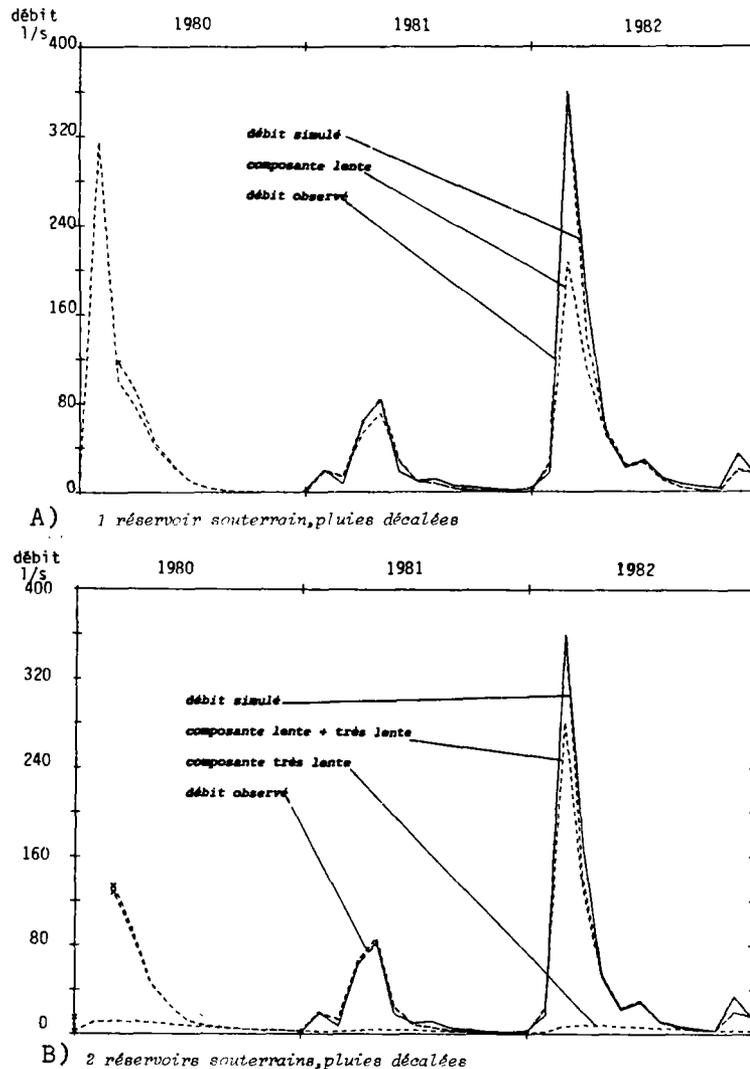


FIG. VI.10 - Simulation des débits mensuels sur la Ravine à Marquet (9181 - 1982)

La très forte majorité des débits est assurée par la vidange du premier réservoir à alimentation et vidange rapide (THG et TGI < 1 mois) qui représente 80 % des débits environ. Il est surtout prépondérant pendant les mois pluvieux et les mois suivant ces fortes pluies.

On remarque que le paramètre H est assez élevé assurant ainsi une forte proportion de percolation. Pratiquement toute l'infiltration (90 %) est réalisée pendant les premiers mois de l'année de janvier à avril.

APRES OPTIMISATION

COEFFICIENT SUR LES PLUIES	0. POURCENT
CAPACITE DE LA RESERVE	210. MILLIMETRES
COEFFICIENT CORRECTEUR D ETP	5.0 POURCENT
HAUTEUR RUISSEL=PERCOLATION	2544.6 MM
TEMPS DE DEMI-MONTEF H -> G	0.44 MOIS
TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT 1	0.42 MOIS
TEMPS 1->2 / SEUIL T1	6.36 MOIS / MM
TEMPS DEMI TARISS. TRES LENT	3.94 MOIS

NOMBRE DE VALEURS RETENUES 25 MOIS

AVEC LA PONDERATION UTILISEE DANS LE CALAGE
 *** R EST UN COEFFICIENT D' AJUSTEMENT

DEBIT EXTERIEUR 0.00 M3/S

SURFACE DU BASSIN VERSANT 1237.880 KM2

R CARRE= 0.9726
 R = 0.9862

TABLEAU VI.5. Valeurs des parametres obtenus sur la ravine à Marquet prise en compte de deux réservoirs souterrains

1.3. Les différents termes du bilan d'eau approchés par les modèles globaux de simulation hydrologique sur plusieurs bassins de La Réunion

1.3.1. Conclusions relatives à la répartition des écoulements

Il apparaît un contraste manifeste (tableau VI.7) au niveau de la répartition des écoulements entre, d'une part, la rivière Langevin, la rivière des Marsouins et la ravine à Marquet qui voient la majorité de leur débit provenir des eaux ayant transité plus ou moins longuement dans leur sous-sol respectif, et, d'autre part, les autres bassins étudiés de la côte Est qui réagissent rapidement et violemment aux pluies importantes et présentent de faibles valeurs d'étiage : la rivière des Roches en est le cas le plus manifeste (en janvier 1980, le débit moyen mensuel est proche de 40 m³/s, alors qu'il est à peine de 1 m³/s à l'étiage).

Il n'apparaît pas sur ces différents bassins de relations nettes entre la décomposition de cet écoulement et les caractéristiques morphologiques couramment employées (indice de compacité de Gravelius, indice de pente de Roche, ...) (tableau VI.6).

Cours d'eau	Station	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Indice de compacité	Indice de pente de Roche	Indice global de pente (M/km)	Pente moyenne (m/km)
Rivière du Mât	Ilet Morin	88.4	40.2	1.21	0.338	138	199
Bras des Cavernes	Ilet Caverne	15.8	20.2	1.43	0.406	147	203
Bras des Lianes	Bellevue	17.7	20.2	1.35	0.456	176	225
Rivière des Roches	Abondance	23.8	25.0	1.45	0.475	170	188
Grand Bras	Vieux Pont	7.1	14.0	1.48	0.454	197	215
Rivière des Marsouins	Ilet Banane	25.8	26.9	1.50	0.376	114	177
Bras Cabot	Prise EDF	16.5	23.9	1.66	0.363	109	157
Rivière Langevin	Grand Galet	26.2	26.3	1.45	0.443	191	216

TABLEAU VI.6

Valeurs de quelques paramètres morphologiques sur les bassins étudiés

Les rivières des Roches et Langevin présentant des indices de compacité et de pente très proches ont des comportements très différents. La rivière du Mat et le Bras de Caverne ayant des caractéristiques morphologiques différentes présentent des répartitions globales des écoulements semblables.

B. MAZENC [4], étudiant la relation entre les paramètres des modèles de simulation et les paramètres physiques des bassins versants respectifs sur plusieurs rivières bretonnes, a remarqué que ces indices (de pente ou de capacité) n'étaient pas toujours représentatifs des variations morphologiques entre différents bassins hydrologiques.

Sans nier pour autant l'influence des caractéristiques morphologiques et physiques des bassins sur leur hydrologie générale [il est évident que la ravine à Marquet (2 km^2) présente un temps de concentration beaucoup plus court et des réserves en eau souterraine beaucoup plus faibles que la rivière du Mat (88 km^2)], les quelques exemples relevés dans le tableau VI.6 et évoqués ci-dessus ne nous ont pas incité à étudier d'éventuelles relations entre ces paramètres physiques et la décomposition de l'écoulement.

Il apparaît par contre que les formations géologiques constituant ces différents bassins jouent un rôle très important dans cette répartition des écoulements. Le caractère très perméable des coulées de la dernière phase du Piton des Neiges (fig. VI.7) ayant colmaté l'ancien cirque des Marsouins et des formations du Piton de la Fournaise (fig. VI.3), favorise l'infiltration des eaux pluviales sur les bassins de la rivière des Marsouins et Langevin, et explique l'importance des composantes souterraines de l'écoulement sur ces bassins. A l'opposé, la majorité des formations affleurant au niveau du bassin de la rivière des Roches (fig. VI.7) sont des formations plus anciennes du Piton des Neiges, phases 2 et 3 de BILLARD, dont l'altération argileuse a renforcé le caractère imperméable. Le ruissellement superficiel est dans ce cas la composante nettement majoritaire de l'écoulement (87 % sur les années 1978 à 1980).

	Écoulement rapide	Écoulement lent
Rivière Langevin	29 23 **	71 77 **
Ravine à Marquet	11 *	89 *
Rivière des Marsouins (1)	35 26 **	65 74 **
(2)	30	70
Bras Cabot	73	27
Rivière des Roches	87	13
Grand Bras	78	22
Bras des Lianes	77	23
Bras de Caverne	64	36
Rivière du Mât	71	29

Ces valeurs sont calculées d'après les années 1978, 1979 et 1980, sauf :

* 1981-1982 sur la rivière Marquet

** 1971-1981 sur les rivières Langevin et des Marsouins

(1) au Barrage EDF - (2) à Ilet Banane

TABLEAU VI.7 - Répartition relative de l'écoulement rapide et de l'écoulement lent (transitant par réservoirs souterrains) sur les bassins étudiés

On remarque que le cyclone Hyacinthe en Janvier 1980 agit fortement sur la proportion d'écoulement rapide d'autant plus que la période prise en compte est courte. La période 1978-1980 sur-estime la proportion d'écoulement rapide par rapport à une période plus longue telle 1971-1981.

1.3.2. Mise en évidence des phénomènes d'infiltration profonde

Nous avons vu dans la quatrième partie qu'une relative incertitude sur l'évaluation des lames d'eau au niveau des bassins du Bras des Lianes et du bras de Caverne et de la rivière du Mât notamment, ne nous permettait pas de conclure quant à la différence (inférieure à 10 %) qui apparaît entre la surface du bassin versant topographique et la superficie calculée par le modèle sur ces différents bassins.

Par contre, les écarts importants entre ces superficies observées et calculées par le modèle sur d'autres bassins ne paraissent pas pouvoir s'expliquer par des erreurs au niveau des données d'entrée et mettent en évidence des phénomènes de pertes ou de transfert d'eau souterraine.

La superficie du bassin de la rivière Langevin est ainsi estimée à une vingtaine de km² contre 36 km² pour le bassin versant topographique. Au contraire, il est possible de considérer que les eaux pluviales tombant sur le versant S.O. du cratère Bory, sans exutoire défini, participe à l'écoulement de la rivière Langevin, augmentant alors sa superficie d'alimentation, ce qui augmenterait d'autant le déficit sur l'écoulement mis en évidence par le modèle. Il ne paraît pas possible de considérer que ceci soit dû à une sur-évaluation de la pluie : en considérant la lame d'eau mesurée à Grand Galet (estimation par défaut de la lame d'eau sur le bassin), l'ajustement réalisé est moins bon, mais aboutit toujours à une superficie réduite (cf 4^{me} partie).

En fait cette superficie calculée par le modèle permet grossièrement de convertir la lame d'eau efficace (P-ETR) en volume écoulé ; 55 % de la pluie efficace participe à l'écoulement observé de la rivière Langevin, c'est-à-dire que 45 % échappe à ce contrôle. L'infiltration alimente les nappes souterraines qui assurent une proportion importante de l'écoulement de la rivière Langevin, mais une proportion équivalente de ces eaux infiltrées percolent vers des nappes plus profondes ou participent à des sous-écoulements non mesurés. Les successions de pertes et résurgences dans le cours de la rivière Langevin laissent supposer qu'au point de jaugeage, une partie des "eaux de surface" s'écoule en fait à quelques mètres de profondeur au niveau d'un paléoréseau hydrographique ou au toit d'un imperméable qui fait réapparaître ces eaux à l'aval.

On observe le même phénomène sur la ravine à Marquet. Le pluviomètre installé au fond de la cuvette de Grand Coin paraît constituer une mesure par défaut de la lame d'eau globale du bassin. Il est inconcevable qu'au contraire, cette mesure en soit le double telle que pourrait le laisser supposer la superficie calculée par le modèle qui représente environ 50 % de la surface du bassin versant topographique. Dans ce cas encore, on considère que 50 % de la pluie efficace participent à des sous-écoulements (alimentation vers l'aval de l'aquifère de la Plaine des Galets, en contrebas dans la vallée de la rivière des Galets des sources Denise et Blanche).

Nous serons moins affirmatif en ce qui concerne le Grand Bras, affluent de la rivière des Roches. On constate cependant que ce bassin doit présenter des lames d'eau plutôt légèrement supérieures à celle du bassin des Roches, que ces lames d'eau permettent de très bien simuler les débits de la rivière des Roches avec correspondance des superficies observées et calculées, mais que par contre les ajustements réalisés sur le Grand Bras conduisent à sous-évaluer la superficie d'environ 25 %. Il est effectivement possible que les eaux collectées à l'amont du bassin s'infiltrèrent en partie dans les coulées récentes qui affleurent dans le cours moyen et paraissent avoir emprunter une paléovallée, susceptible de canaliser ces eaux infiltrées en aval du cours actuel du Grand Bras ; 25 % de la pluie efficace échapperaient ainsi au contrôle des débits dans la rivière.

Au niveau du Bras Cabot, ces phénomènes de pertes sont pratiquement prouvés, car ils correspondent à un gain observé sur la rivière des Marsouins. Il y a en fait échange souterrain entre ces deux bassins voisins (cf 4^{me} partie). Si des incertitudes subsistent, là aussi, au sujet de l'évaluation précise des lames d'eau et par conséquent au niveau des proportions de pluie efficace qui ainsi transitent d'un bassin à l'autre, les ordres de grandeur avancés nous paraissent acceptables. L'étude conjointe du Bras Patience (autre affluent de la rivière des Marsouins permettrait de préciser la cohérence de ces valeurs).

1.3.3. Approche quantitative du bilan d'eau sur quelques bassins de La Réunion

Tenant compte des différents résultats des simulations (coefficients correcteurs sur les données climatiques -pluie et ETP-, décomposition de l'écoulement, estimation des superficies "efficaces"* des bassins versants), nous donnons dans le tableau VI.8 des estimations moyennes pour la période 1971-1981 des différents termes du bilan d'eau.

* Ce terme caractérise la superficie calculée par le modèle qui convertit la lame d'eau correspondant à la pluie efficace en débit, c'est-à-dire que toute la hauteur de pluie tombant sur cette surface, non reprise par évapotranspiration, participe à l'écoulement mesuré au point de jaugeage.

TABLEAU VI.8 - Différents termes du bilan hydrologique déduits des résultats des simulations par modèle global exprimé en volume moyen annuel, en 10^6 m^3 - Période 1971-1981

	Pluie	ETP	Pluie efficace	Ecoulement total	Ecoulement rapide	Ecoulement lent	Sous-écoulement (+) apport (-) pertes	Infiltration totale		
								au niveau du bassin	% pluie efficace	débit ** spécifique
Rivière Langevin	147	41	106	57	13	44	- 49	93	+ 88	82
Rivière des Marsouins (EDF)	114	24	90	150	39	111	+ 60	51	57	58
Rivière des Marsouins (ilet Banane)	100	25	77	132	35	97	+ 55	42	55	52
Bras Cabot	75	17	58	45	33	12	- 13	25	43	48
Rivière des Roches	145	24	121	118	103	15	- 3	18	15	24
Grand Bras	49	8	41	32	25	7	- 9	16	39	71
Bras des Lianes	124	14	110	104	80	24	- 6	30	27	53
Bras de Caverne	53	13	40	46	29	17	+ 6*	11	27	22
Rivière du Mât	295	65	230	265	188	77	+ 35*	32	18	15
Bras de Cilaos	137	37	100	95	66	29	- 5	34	34	15
Ravine à Marquet	5.5	2.2	3.3	1.7	0.2	1.5	- 2.6	3.1	94	42

*Ces apports souterrains nous paraissent peu probables, étant donné la géométrie des bassins correspondants. Une sous-évaluation des lames d'eau nous paraît plus concevable (cf 4^{me} partie)

**En l/s/km²

Ces valeurs ne sont que des indications, la période réellement observée est dans la majorité des cas beaucoup trop restreinte (2 à 3 ans), pour garantir l'unicité des relations établies.

On remarque la très forte proportion d'eau qui s'infiltré au niveau des bassins de la rivière Langevin et de la ravine à Marquet, respectivement 88 et 94 % de la pluie efficace. Par contre au niveau de la rivière des Marsouins, la prépondérance de l'écoulement souterrain étant dû en partie aux infiltrations sur les bassins voisins du bras Cabot et du bras Patience, l'infiltration ne représente que 57 % de la pluie efficace. Il est par ailleurs possible que les lames d'eau utilisées soient sous-estimées, ce qui reviendrait à diminuer cette proportion. En effet au niveau du Bras Cabot, cette infiltration ne représente que 43 % de la pluie efficace ; si l'on augmente légèrement les lames d'eau sur ces deux bassins, on doit pouvoir obtenir des ajustements corrects qui impliqueraient plus de pertes au niveau du bras Cabot et moins d'apport pour la rivière des Marsouins, c'est-à-dire que l'on obtiendrait des proportions équivalentes pour ces bassins entre l'infiltration et le ruissellement.

Sur les autres bassins, l'infiltration représente entre 15 et 30 % de la pluie efficace. Le minimum s'observe à la rivière des Roches qui réagit aux précipitations presque exclusivement en ruissellement. La faible valeur observée sur la rivière du Mât semble être due à une sous-évaluation de la lame d'eau que le modèle a corrigé en augmentant la superficie d'alimentation. Si les apports extérieurs sont possibles (cascades du Voile de la Mariée alimentées par le bassin du Bras de Caverne), la proportion calculée semble exagérée. Il en est de même au niveau du Bras de Caverne.

Nous retiendrons surtout les fortes potentialités en eau souterraines dont semblent disposer la majorité des bassins étudiés, la plus forte valeur étant obtenue par la rivière Langevin avec 82 l/s/km².

Nous rappellerons aussi que les bassins jaugés ne sont pour la plupart que les parties amont de bassins plus étendus. Il est fréquent que les eaux qui s'écoulent en surface à l'amont, se perdent ensuite, au moins en partie, dans les alluvions dans le secteur aval des bassins et alimentent ainsi les eaux souterraines : nappes alluviales et nappes côtières.

2. ETUDE DU BASSIN VERSANT TEMOIN DE DOS D'ANE

2.1. Présentation générale

Ce petit bassin a été choisi par le Comité Départemental de l'eau de La Réunion, pour appréhender les différents termes du bilan hydrologique dans un secteur aussi représentatif que possible des "hauts de l'ouest", où les problèmes en eau s'avèrent les plus cruciaux.

L'amphithéâtre d'érosion régressive que constitue ce bassin versant domine d'environ 1000 m la rivière des Galets à la sortie du cirque de Mafate (fig. VI.11). Le fond relativement plat de cette cuvette, entre 1000 et 1100 m d'altitude, est ceinturé par des remparts abrupts culminant à 1510 m au N.E..

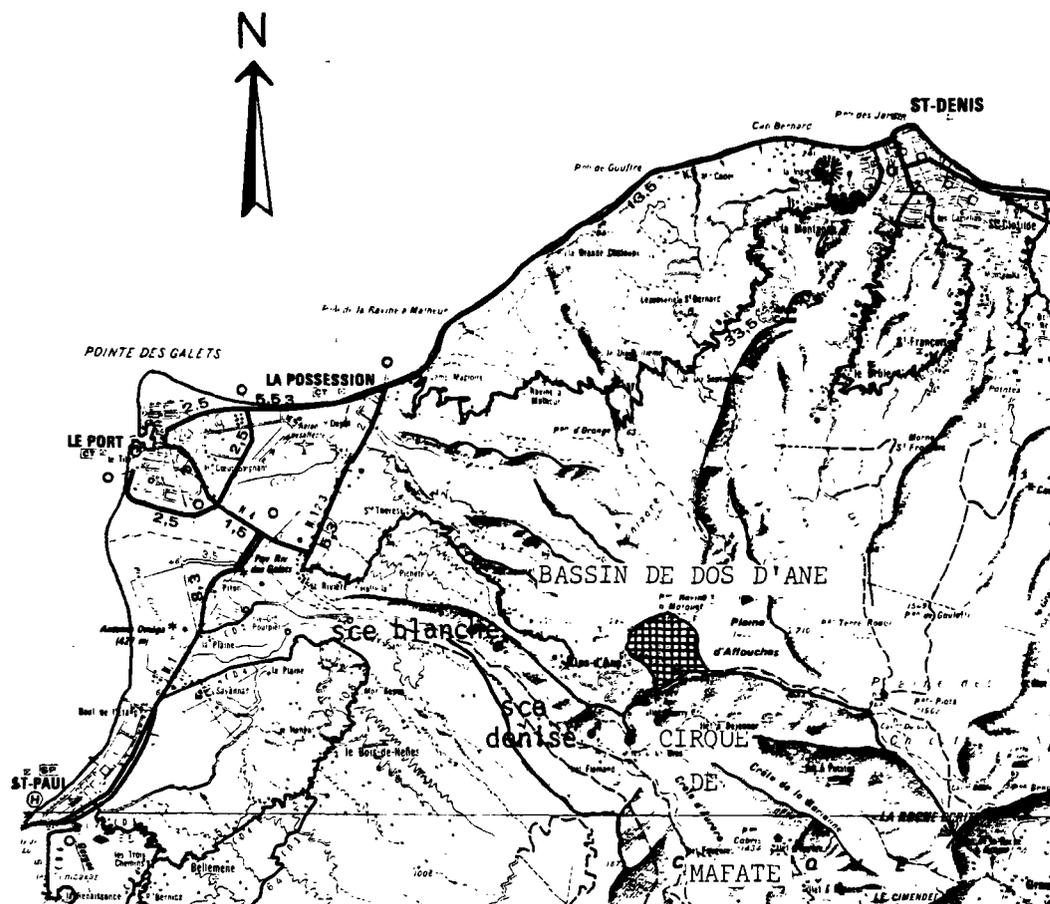


FIG. VI.11

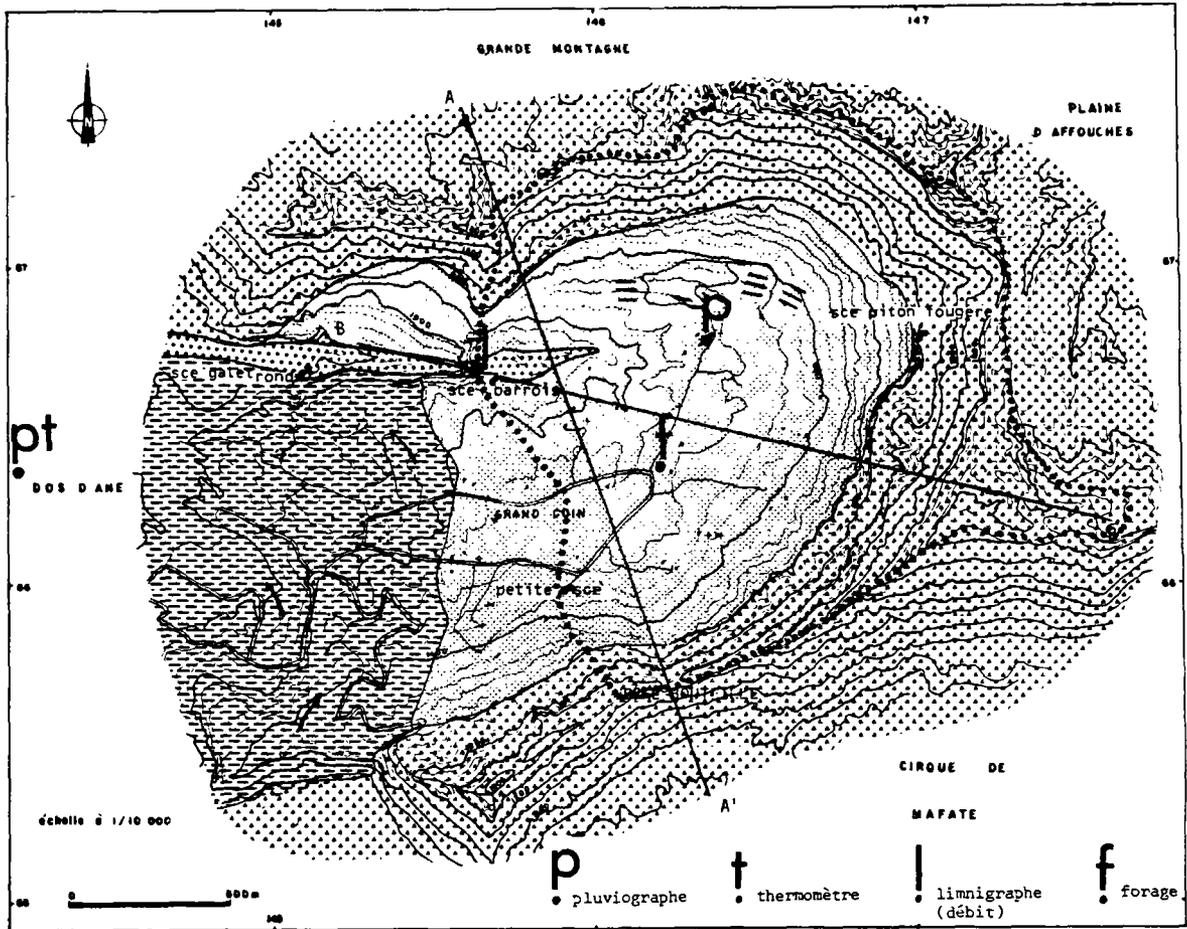
Localisation du bassin versant
amont de la ravine à Marquet
dit "bassin de Dos d'Ane"

Ces remparts sont constitués par les formations de la phase II du Piton des Neiges, où dominent les coulées de basaltes à alumine et d'océanites. On note au sein de ces formations une brèche volcanique qui affleure dans le rempart Sud et constitue le relief particulier de Verre Bouteille (fig. VI.12). L'altération pédologique a entraîné l'apparition de couches argilisées dont le niveau le plus net apparaît au milieu du rempart : le caractère semi-perméable à imperméable de cette formation constitue le mur d'un petit aquifère perché partiellement capté aux sources du Piton Fougères (fig. VI.12). Le pendage des couches conforme à la pente topographique générale laisse supposer que l'aire d'alimentation de ces petits aquifères perchés, dépasse le cadre du bassin versant superficiel et s'étend sous la plaine d'Affouche.

A la base du rempart, s'accumulent des éboulis (blocs supérieurs au m³) et des formations détritiques diverses résultant du démantèlement du rempart par l'érosion, qui constituent les affleurements les plus abondants dans la cuvette de Grand Coin. Ils sont relayés à l'aval par des formations tufacées de la dernière phase du Piton des Neiges qui auraient recouvert partiellement les paléoreliefs existants (fig. VI.12). Ces formations ont été rencontrées (de 20 à 40 m) dans le forage de Grand Coin sous les niveaux détritiques (0 à 20 m).

Ces terrains constituent un aquifère superficiel reconnu au niveau du forage et qui affleure localement au pied du rempart (marécage dans le secteur de la ferme avicole). Son alimentation est en partie assurée par les petites nappes perchées du rempart, dont les eaux s'infiltrant dans les formations détritiques juste à l'aval de leur émergence. Cet aquifère est certainement à l'origine de la Source Barrois, voire de la Source Galet Rond, et soutient les débits de la ravine à Marquet (ruissellement à l'aval de la zone marécageuse). Les faibles valeurs d'étiage de la ravine, inférieures au l/s, indiquent la relative faiblesse de ces réserves.

Une coulée de puissance décamétrique de basalte différenciée (présence de nombreux feldspaths plagioclases en phénocristaux) assure un bon contrôle de la ravine en formant une cascade à l'aval du limnigraphe. Cette coulée s'est épanchée lors des dernières phases d'activité dans la paléovallée de la ravine à Marquet, son extension a été reconnue sur quelques centaines de mètres vers l'amont et il est possible qu'elle soit à l'origine de la source Barrois en jouant le rôle d'imperméable local (fig. VI.12).



○ limite du bassin versant

• Source

■ Coulée basaltique de la phase II avec niveaux plus ou moins imperméabilisés

■ Coulée basaltique de la phase III "de fond de vallée"

■ Couléés tuffacées de la phase IV

■ Eboulis, colluvion et épandages détritiques divers

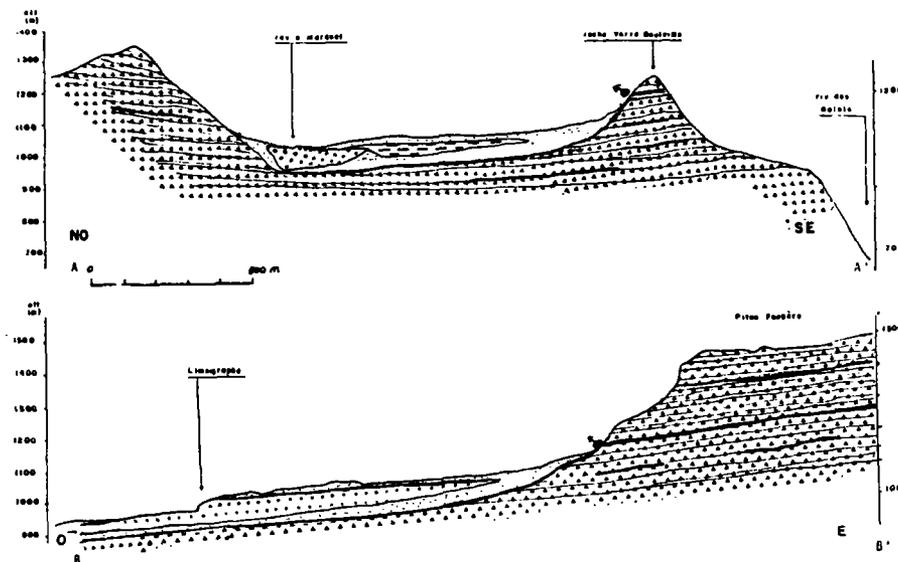


FIG. VI.12 - Carte géologique du bassin de la ravine à Marquet et coupes schématiques interprétatives

L'équipement progressif du bassin commencé en novembre 1980 nous permet de disposer d'enregistrements journaliers simultanés des hauteurs de pluie, du niveau dans la ravine et plus tardivement du niveau piézométrique (fig. VI.12). Nous disposons en outre des mesures de températures et hauteurs de pluie à Dos d'Ane depuis 1966.

Des essais de pompage réalisés en février 1982, dans des conditions hydrologiquement très favorables, sur le forage, ont donné les résultats suivants :

- débit spécifique de $3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ de rabattement,
- pertes de charges anormales représentant environ 15 % du rabattement,
- une transmissivité de l'ordre de $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ correspondant à une perméabilité horizontale de $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

2.2. Approche mensuelle de la relation pluie-débit

2.2.1. Coefficient d'écoulement

En relation avec une hauteur de pluie plus abondante, les débits en 1982 sont nettement supérieurs à ceux de 1981, mais ils ne représentent, au niveau annuel, qu'à peine le tiers des précipitations. L'étude mensuelle du rapport de lame d'eau écoulee par rapport à la hauteur de précipitation (tableau VI.10) montre la prépondérance d'un écoulement retardé. Les mois suivant les périodes très pluvieuses présentent des rapports élevés (avril-mai 1981, mars-avril 1982).

La comparaison des valeurs d'octobre et novembre 1982 (précipitations équivalentes et débits moyens par contre très différents) nous a amené à reconsidérer quelque peu le découpage des valeurs mensuelles. Les jours de fin de mois correspondant à des épisodes pluvieux importants (105 mm le 30.10.1982) ont été rattachés au mois suivant, ce phénomène n'intéresse que quelques mois de la période 1981-1982 et modifie surtout les valeurs relatives à la pluie (tableau VI.11).

TABLERAU VI.10 - Lame d'eau écoulee sur le bassin versant comparée à la pluie (étude mensuelle 1981-1982)

Année		Hauteur de la précipitation mensuelle (H 1) en mm	Hauteur de la lame d'eau mensuelle écoulee (H 2) en mm	Rapport H 1/H 2 en %
1981	J	324.5	22.8	7
	F	111.5	7.6	6.8
	M	374.5	72.4	19.3
	A	213.5	91.1	42.6
	M	30	20.4	68.1
	J	84	11.6	13.8
	J	68	13	19.2
	A	9.5	6.3	66.8
	S	29	4.3	15
	O	40	2.5	6.3
	N	74.5	1.8	2.4
	D	176	3.1	1.8
Total Année		1535	256.6	16.7
1982	J	251	21.4	8.6
	F	1114	402.6	36.1
	M	270	197.5	73.2
	A	129.5	57.1	44.1
	M	90	25.2	28
	J	130	32.2	24.7
	J	35	14	39.9
	A	46.5	8.3	17.9
	S	46	5.1	11.2
	O	155	6.5	4.2
	N	155.5	37.3	24
	D	121	15.1	12.5
Total Année		2543	822.3	32.3

TABLEAU VI.11 - Décalage des jours pluvieux de fin de mois au mois suivant - Influence sur les valeurs de pluies et débits mensuels

Mois	Hauteur de pluie en mm		Débit moyen mensuel en l/s	
	avant	après	avant	après
Mars 1981	370	282	62.7	62.7
Avril 1981	214	285	81.5	83
Mai 1981	30	52	17.7	18.3
Juin 1981	84	57	10.4	9.8
Juillet 1981	68	95	11.3	11.7
Octobre 1982	155	48	5.6	3
Novembre 1982	156	263	33.4	34

2.2.2. Application du modèle GARDENIA

Nous avons simulé les débits mensuels de la ravine à Marquet par le modèle GARDENIA (cf 4me partie), à partir des séries mensuelles, puis en considérant un déphasage lié aux jours pluvieux de fin de mois ; dans les deux cas, nous avons envisagé la possibilité de faire intervenir un seul réservoir souterrain ou deux (fig. VI.13).

Le meilleur ajustement a été obtenu en faisant intervenir deux réservoirs et en décalant les pluies de fin de mois au mois suivant (fig. VI.13 D). Dans tous les cas cependant, le modèle reproduit assez bien les variations saisonnières du débit. Le modèle ne faisant intervenir qu'un seul réservoir est cependant plus grossier et s'avère incapable de soutenir les débits d'étiage. Le fait de décaler les pluies améliore l'ajustement sur la période de mars à juillet 1981 ; par contre, la reprise de novembre 1982 est dans tous les cas sous-évaluée. Les autres écarts se manifestant dans tous les cas concernent les mois de juillet 1981 (reprise trop faible), février et mai 1981 (tarissement trop lent), mars 1982 (tarissement trop rapide).

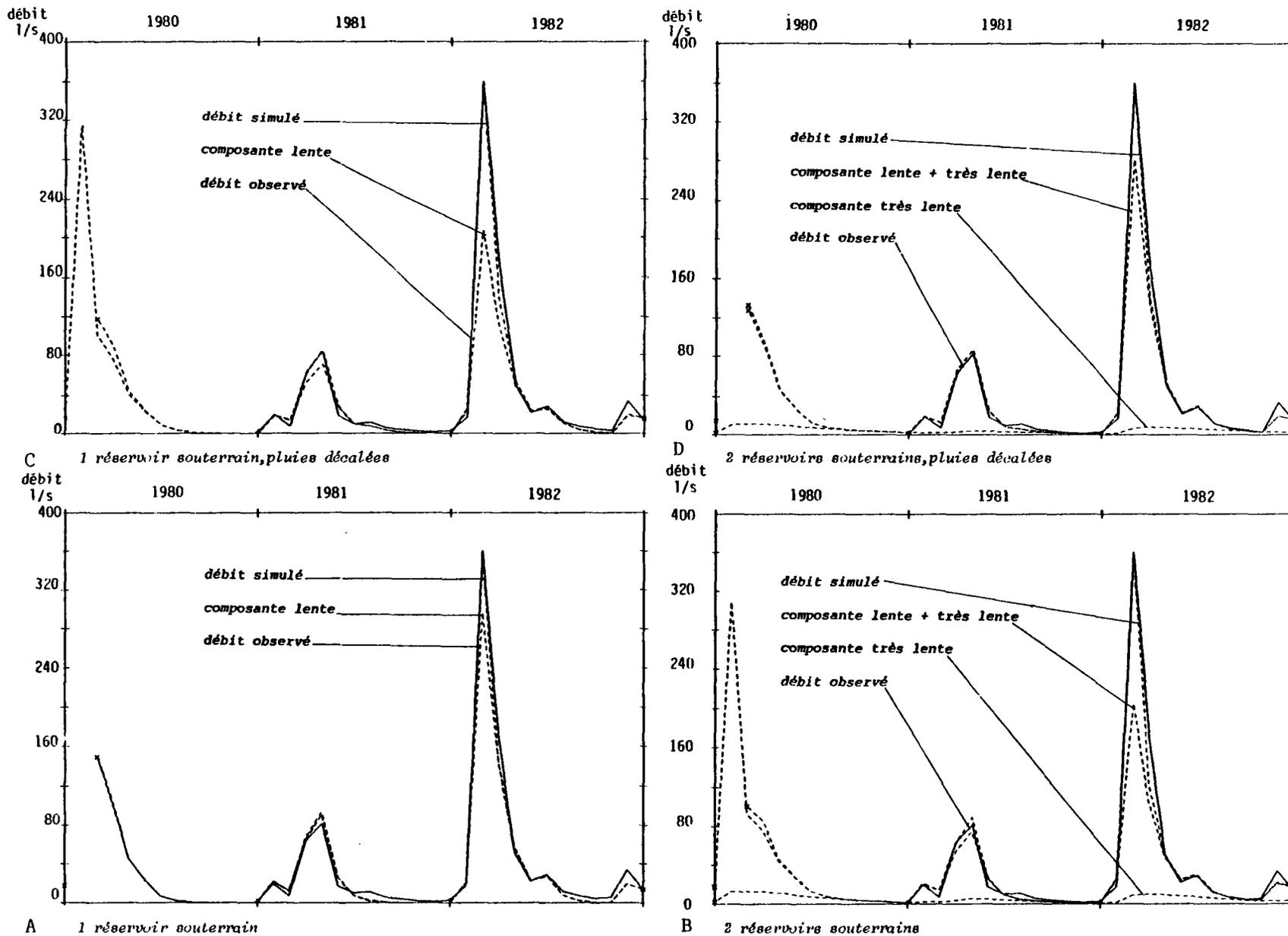


FIG. VI.13 - Simulation des débits mensuels 1980-1982 à Dos d'Ane - Influence de l'échantillon de pluies et du nombre de réservoir

Les coefficients d'ajustements sont dans tous les cas très élevés ($\approx 0,98$ pour les coefficients pondérés donnant plus d'importance aux faibles débits, $> 0,99$ pour les coefficients naturels). Au point de vue de la sensibilité des paramètres, certains semblent bien définis (la modification de leur valeur optimale trouvée conduit à une perte sensible de l'ajustement). C'est le cas de la capacité de la réserve centrée autour de 200 mm. D'autres paramètres ne paraissent pas avoir une influence déterminante sur la qualité de l'ajustement ou du moins ont une grande plage de variation. Le tableau VI.12 ci-après reprend les limites approchées de variation des paramètres n'entraînant pas de perte notable de la qualité de l'ajustement.

TABEAU VI.12 - Valeurs extrêmes des paramètres du modèle conduisant à un ajustement correct

Coefficient sur les pluies	: 0 %	
Capacité de la réserve	: 150 à 220 mm	
Coefficient correcteur d'ETP	: 0 à 5 %	
Hauteur ruissel.Percolation	: 750 à 3000 mm	Temps de demi-tariss. observés
Temps de demi-montée H -> G	: 0,1 à 0,6 mois	
Temps de demi-tarissement 1	: 0,2 à 0,7 mois	
Temps 1->2 / seuil T1	: 5 à 10 mois	35 jours : 1 mois
Temps demi-tariss. très lent	: 2 à 4 mois	165 jours : 5,5 mois
Surface du bassin versant	: 1,08 à 1,24 km ²	

Il ne s'agit pas d'une véritable étude de sensibilité des différents paramètres, ce tableau ne reprend que les valeurs extrêmes des paramètres, obtenues dans diverses simulations et conduisant à des ajustements corrects. (coefficients d'ajustement $> 0,98$).

Au vu de la surface du bassin versant calculée, le modèle considère que 50 % de la pluie efficace participent à l'écoulement de la ravine à Marquet et que par conséquent 50 % échappent à ce contrôle.

TABLEAU VI.13 - Simulation des débits de la ravine à Marquet par modèle global à réservoir fonctionnant au pas de temps mensuel

ANNEE 1981 BILAN EN MM

ANN.	MOIS	PLUIE	ETP	ETR	P. EFF	Q CAL	Q OBS	Q RAP	Q INT	Q LEN	TEMPE	STOCK	DENSI	R SUP	R RAP	R INT	R LENT
1981	JANV	371.	104.	104.	57.	43.	42.	1.	37	5.	10.0	0.	0.0	210.	12.	4.	28.
1981	FEVR	112.	94.	94.	18.	28	15.	0.	22	5.	10.0	0.	0.0	210.	6.	2.	26.
1981	MARS	282.	87.	89.	193.	140.	133.	7.	126	7.	10.0	0.	0.0	210.	39.	13.	35.
1981	AVRI	285.	76.	76.	209.	184.	176.	11.	164	9.	10.0	0.	0.0	210.	48.	17.	47.
1981	MAI	52.	71.	71.	0.	53.	39.	0.	44.	9.	10.0	0.	0.0	191.	10.	5.	44.
1981	JUIN	57.	63.	63.	0.	17	21.	0.	10.	7.	10.0	0.	0.0	185.	2.	1.	38.
1981	JUIL	95.	62.	62.	7.	13.	25.	0.	7	6.	10.0	0.	0.0	210.	2.	1.	33.
1981	AOUT	10.	70.	70.	0.	7.	12.	0.	2.	5.	10.0	0.	0.0	150.	0.	0.	28.
1981	SEPT	29.	72.	72.	0.	5	8.	0.	0.	4.	10.0	0.	0.0	107.	0.	0.	23.
1981	OCTO	40.	85.	85.	0.	4.	5.	0.	0.	4.	10.0	0.	0.0	62.	0.	0.	20.
1981	NOVE	75.	90.	90.	0.	3.	3.	0.	0.	3.	10.0	0.	0.0	47.	0.	0.	16.
1981	DECE	176.	94.	94.	0.	3.	6.	0.	0	3.	10.0	0.	0.0	128.	0.	0.	14.
1981-1981		1584.	971.	971.	485.	500.	485.	19	413.	68							

ANNEE 1982 BILAN EN MM

ANN.	MOIS	PLUIE	ETP	ETR	P. EFF	Q CAL	Q OBS	Q RAP	Q INT	Q LEN	TEMPE	STOCK	DENSI	R SUP	R RAP	R INT	R LENT
1982	JANV	254.	100.	100.	73.	50.	36.	1.	46.	3.	10.0	0.	0.0	210.	15.	5.	16.
1982	FEVR	1114.	91.	91.	1023.	759.	764.	162.	582	15.	10.0	0.	0.0	210.	163.	61.	76.
1982	MARS	270.	91.	91.	179.	296.	363.	20.	258.	18.	10.0	0.	0.0	210.	64.	27.	91.
1982	AVRI	130.	79.	79.	51.	113.	108.	2.	94.	17.	10.0	0.	0.0	210.	23.	10.	87.
1982	MAI	90.	72.	72.	18.	50	46.	0.	39.	15.	10.0	0.	0.0	210.	8.	4.	76.
1982	JUIN	131.	66.	66.	65.	64.	61.	1.	60.	13.	10.0	0.	0.0	210.	15.	5.	69.
1982	JUIL	35.	63.	63.	0.	25.	26.	0.	14.	11.	10.0	0.	0.0	182.	3.	1.	60.
1982	AOUT	47.	70.	70.	0.	13.	15.	0.	3.	10.	10.0	0.	0.0	159.	1.	0.	50.
1982	SEPT	46.	75.	75.	0.	9.	10.	0.	1.	8.	10.0	0.	0.0	130.	0.	0.	42.
1982	OCTO	48.	85.	85.	0.	7.	6.	0.	0.	7.	10.0	0.	0.0	93.	0.	0.	35.
1982	NOVE	263.	90.	90.	56.	43.	72.	1.	36.	6.	10.0	0.	0.0	210.	11.	4.	34.
1982	DECE	121.	96.	96.	25.	32.	28.	0.	26.	6.	10.0	0.	0.0	210.	7.	3.	31.
1982-1982		2549.	978.	978.	1489.	1462.	1536.	188.	1145.	128							

La prépondérance de l'écoulement lent (appelé "intermédiaire" dans cette version mensuelle) est très nette (83 % et 78 % de l'écoulement total pour les années 1981 et 1982). Cet écoulement intermédiaire est toujours important le mois de fortes pluies et le mois suivant, il s'annule pratiquement en 3 ou 4 mois (tableau VI.13). Le réservoir intermédiaire qui soutient cet écoulement, présente un temps de demi-montée et de demi-tarissement de l'ordre du demi-mois. L'écoulement rapide n'est effectif que les mois à pluviosité élevée, l'écoulement très lent est maximal en fin de saison des pluies et minimal en fin de saison sèche, mais la lame d'eau mensuelle écoulée correspondante ne dépasse pas 20 mm sur la série observée. Au niveau annuel, cet écoulement est équivalent, en volume écoulé, à l'écoulement rapide.

2.2.3. Extension des débits à la période 1967-1982

Une fois le calage du modèle effectué, il est possible d'étendre la série des débits en fournissant les données climatiques pluie et ETP. Le poste de Dos d'Ane fonctionnant depuis 1966 (cf § 2.1.), nous reconstituons les débits de la ravine à Marquet sur la période 1967-1982.

Compte-tenu de la faible variabilité de la distribution mensuelle de l'ETP d'une année à l'autre, nous avons pris les valeurs mensuelles moyennes interannuelles établies sur la période 1971-1981.

Pour l'extension des données de pluies, nous avons utilisé les relations établies entre les postes de Dos d'Ane et Grand Coin (annexe VI. 2). Nous avons en fait considéré 3 échantillons de lames d'eau : les pluies à Dos d'Ane (P_1), les pluies calculées par application de la régression linéaire sur les pluies (P_2) et sur les racines carrées de ces pluies (P_3) - rapport de 1,5 entre P_2 et P_1 , écarts surtout sur les fortes valeurs en faveur de P_2 entre P_2 et P_3 .

Nous avons retenu comme paramètres, ceux donnant le meilleur ajustement (version à deux réservoirs).

Les différentes chroniques de débits D_1 , D_2 et D_3 (fig. VI.14) calculées à partir de ces trois échantillons de lames d'eau présentent une distribution saisonnière très nette (régime pluvial tropical de PARDE). Le maximum intervient pendant la saison des pluies de décembre à avril, l'étiage très sévère de la saison sèche conduit à la quasi-annulation des débits. En moyenne, 80 % des débits s'écoulent de janvier à avril, moins de 10 % de juin à novembre. L'étiage peut se poursuivre jusqu'en janvier (1969) ou au contraire la remontée des débits peut intervenir en novembre ou décembre, octobre s'avère être en moyenne le mois de plus faible débit. Le cyclone Hyacinthe, en janvier 1980, ayant été exceptionnellement pluvieux, le mois de janvier est celui dont la moyenne est la plus élevée, mais régulièrement février, mars et même avril présentent de plus forts débits moyens mensuels (tableau VI.14).

TABLEAU VI.14 - Données statistiques sur les débits simulés de la ravine à Marquet au pas de temps mensuel sur la période 1967-1982 - Lames d'eau obtenues d'après régressions linéaires sur les racines des hauteurs de pluies mensuelles entre Dos d'Ane et Grand Coin, valeurs en l/s

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moyenne	171.5	157.2	118.1	86.7	39.6	19.3	10.4	8.8	7.3	4.5	7.2	25.	54.6
Médiane	56	140	108	73.5	34	16	7.5	5.	3.9	3.5	3.7	3.6	45
Maxima rang 1	1127	378	305	226.6	68.6	43.1	30.4	52.5	37.8	12.8	38.6	114.6	142.2
rang 3	302.5	211.5	149.5	120	63.8	32.3	15.6	8.9	7.2	6.9	6.4	51.7	71.9
rang 14	15	37.8	55.9	49.6	18.8	8.8	4.8	3.5	2.8	2.3	1.9	1.6	25.9
rang 16 minima	1.9	18.8	33.3	37.8	15.1	7.1	4.4	3.0	2.1	1.7	1.4	1.2	20.1

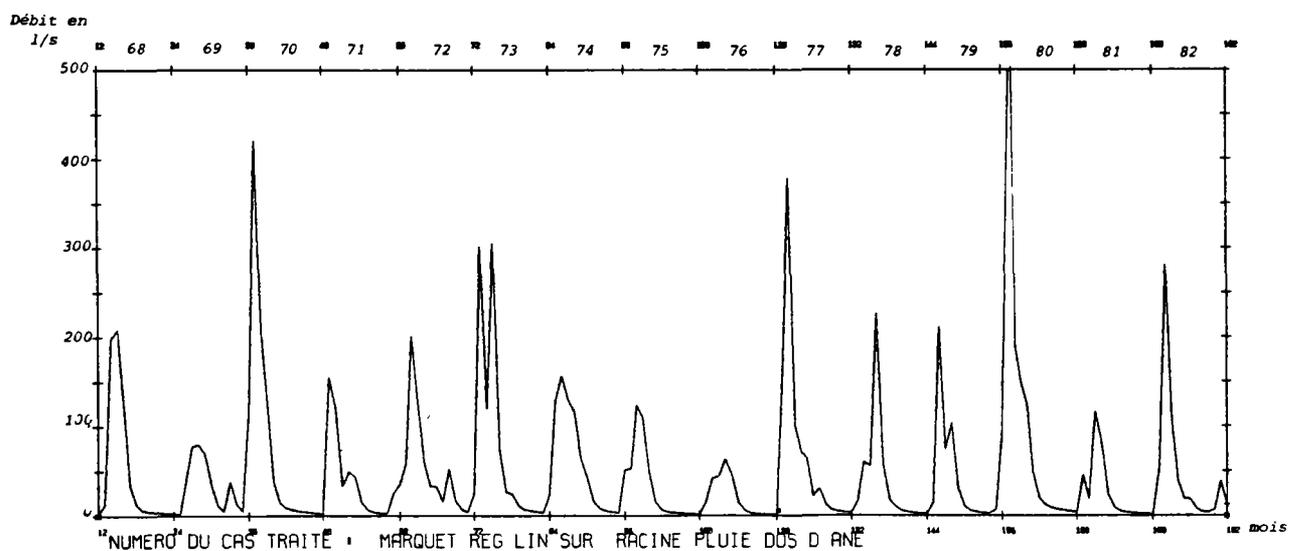
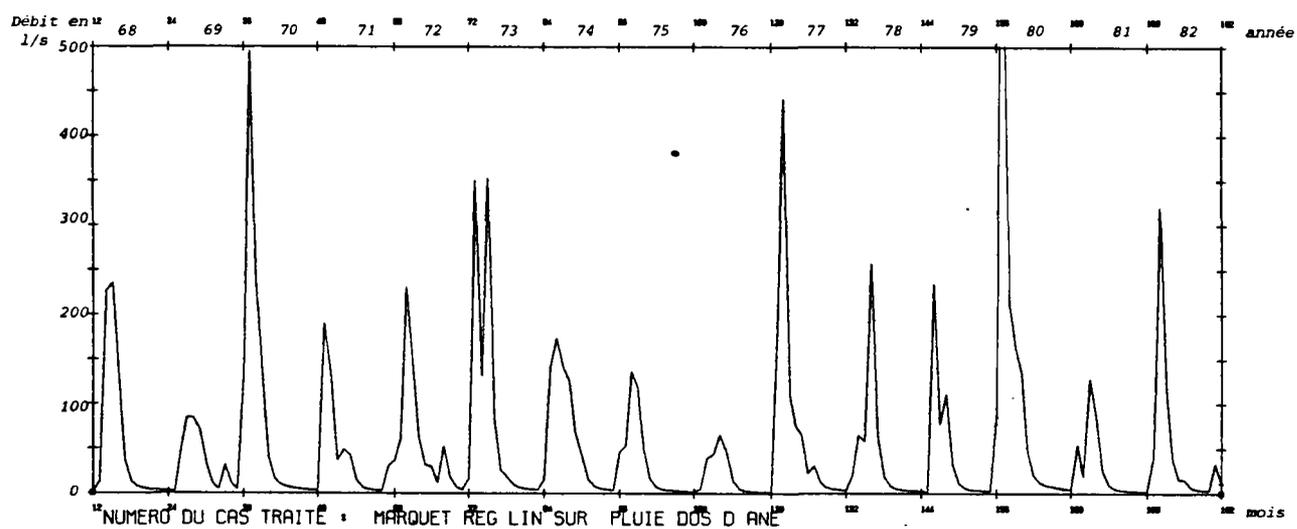
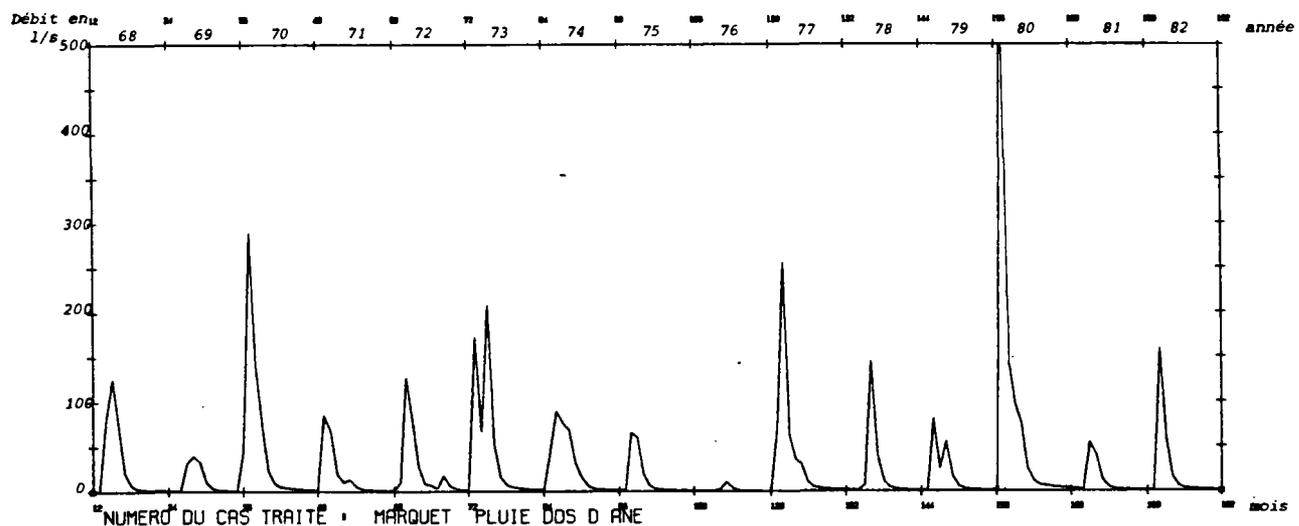


FIG.VI.14 - Débits mensuels simulés de la ravine à Marquet sur la période 1967-1982 en utilisant différents échantillons de lames d'eau

Le classement de ces différentes valeurs mois par mois (tableau VI.14) montre que décembre est le plus souvent la limite entre la fin de l'étiage et la reprise des précipitations efficaces ; une année sur deux le débit moyen mensuel est inférieur à 5 l/s pour les mois d'août à décembre, quatre années sur cinq il est inférieur à 10 l/s les mois d'août à novembre. Seuls les mois de mars et avril connaissent au moins 4 années sur 5 des débits supérieurs à 50 l/s et jusqu'à présent leurs débits ont toujours été supérieurs à 30 l/s.

Le classement de ces débits moyens mensuels est pratiquement conforme à celui des hauteurs de pluies. Même au niveau annuel, les années de fortes pluies correspondent à celles de forts débits et, de même pour les faibles valeurs, les fortes pluies de décembre en perturbent l'exacte conformité ; elles n'ont que peu d'influence en général sur les débits de l'année considérée. Les années 1981 et 1982 qui ont reçu des hauteurs de pluie respectivement plutôt faibles et à peine moyenne, donnent des débits moyens annuels de rang respectif 14 et 8.

Le débit moyen annuel augmente plus vite que la hauteur de pluie correspondante : un rapport de 1 à 4 entre les pluies annuelles extrêmes conduit à un rapport de 1 à 7 sur 7 sur les débits correspondants. L'évapotranspiration potentielle étant relativement constante d'une année sur l'autre, l'écoulement annuel ne peut représenter une proportion constante de la hauteur de pluie mais plutôt de la pluie efficace (50 % d'après le modèle).

Excepté pour les rares années où la hauteur de pluie est très faible, la réserve du sol ne se désature pas totalement et en moyenne nous pouvons considérer que :

$$\begin{aligned} \text{ETR} &\approx \text{ETP} \\ P_{\text{eff}} &\approx P - \text{ETR} \end{aligned}$$

D'après les valeurs moyennes interannuelles ainsi approchées sur la période 1967-1982, nous aurions :

$$\begin{aligned} P &\approx 2400 \text{ mm} \\ \text{ETP} &\approx 970 \text{ mm} \\ P_{\text{eff}} &\approx 1430 \text{ mm} \\ \text{Débit} &\approx 740 \text{ mm (54,6 l/s)} \end{aligned}$$

et par conséquent, une lame d'eau moyenne interannuelle de 700 mm qui s'infiltrerait profondément.

Le classement des 192 valeurs mensuelles de débits simulés (fig. VI.15) montre qu'un mois sur deux le débit est inférieur à 15 l/s, un sur quatre est inférieur à 5 l/s. A l'opposé, moins d'un sur trois est supérieur à 50 l/s, et un sur six seulement est supérieur à 100 l/s.

2.2.4. Influence de la lame d'eau

Si au lieu d'utiliser la régression linéaire sur les racines carrées des pluies mensuelles, on utilise celle sur les pluies mensuelles, seules les fortes valeurs de débits (au delà de 100 l/s) sont affectées (fig. VI.14 et VI.15 A). La divergence sur les pluies reconstituées n'affectent également que les fortes valeurs (annexe VI.1).

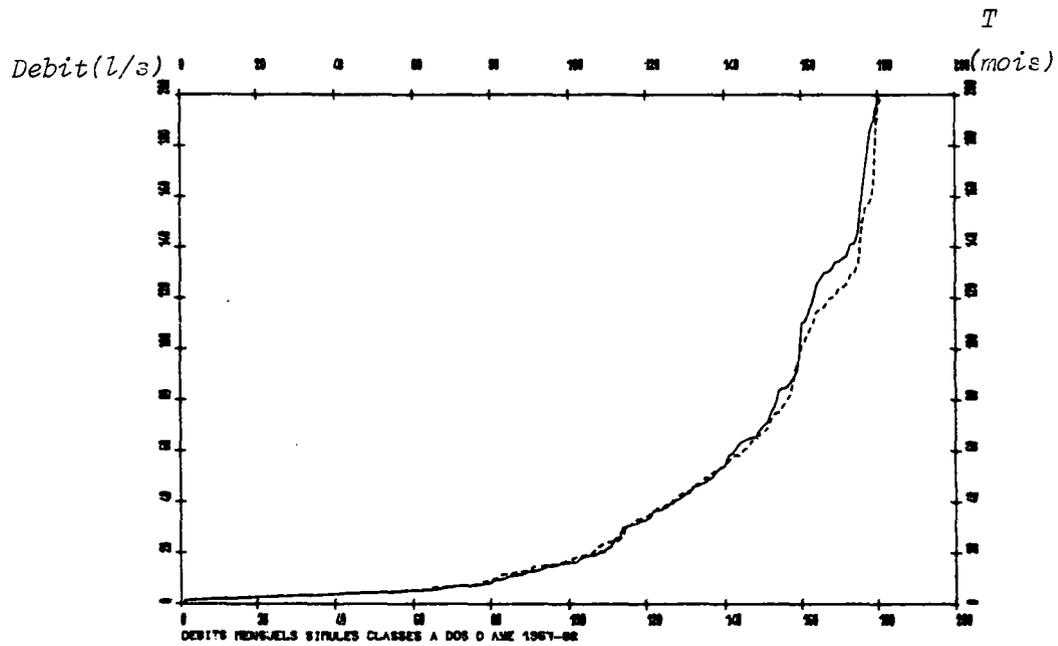
La distribution des débits est analogue dans les deux cas sur la période considérée, seuls les pics de forts débits sont un peu modifiés.

Par contre, si l'on utilise l'échantillon P_1 (pluies au poste de Dos d'Ane), les débits sont divisés par un rapport de 2 environ (contre 1,5 sur les pluies), les étiages beaucoup plus prononcés, les reprises moins nettes ou absentes. (A évaporation égale, les pluies efficaces sont beaucoup plus faibles dans le deuxième cas). Un débit sur dix dépasse 100 l/s, deux sur trois sont inférieurs à 10 l/s.

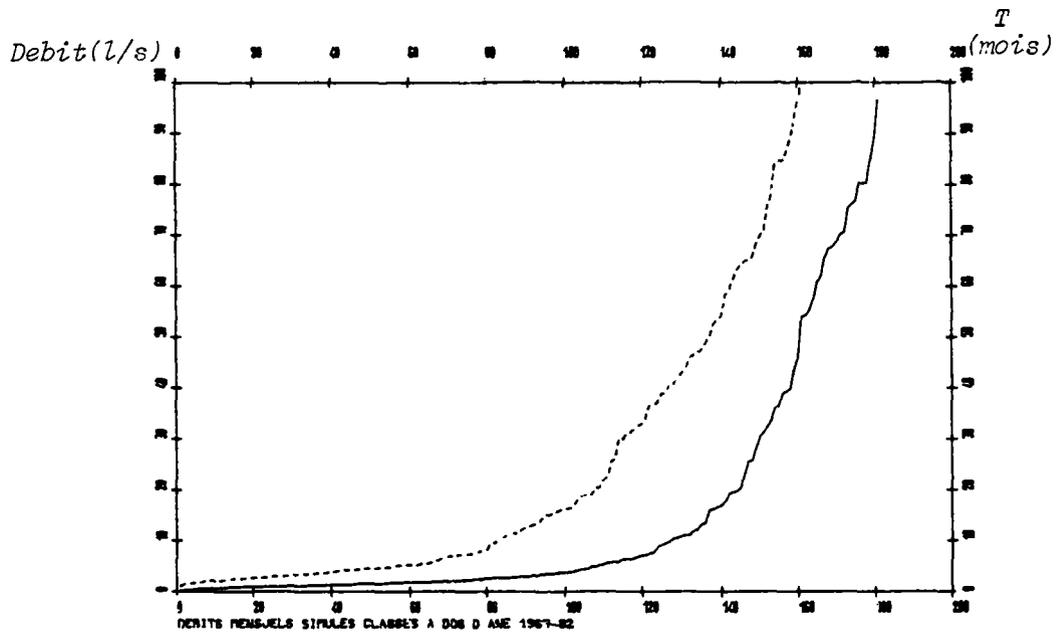
2.3. Approche journalière de la relation pluie-débit par le modèle AMANDE

Les épisodes pluvieux importants étant le plus souvent de l'ordre de quelques jours, voire de quelques heures (fig. VI.16), l'étude mensuelle de la relation pluie-débit peut sembler bien grossière.

Les modèles à pas de temps mensuels sont-ils adaptés à décrire les différentes composantes de l'écoulement et les différents termes du bilan d'eau sous des conditions climatiques aussi contrastées qu'à La Réunion ?



A - Lames d'eau d'après (—) régression linéaire sur pluies
(---) régression linéaire sur racines de pluies



B - Lames d'eau d'après (—) pluies à Dos d'Ane
(---) régression linéaire

FIG. VI.15 - Classement en ordre croissant des débits simulés de la ravine à Marquet - Période 1967-1982 (192 valeurs)

Les enregistrements journaliers des hauteurs de pluie et débits nous permettent d'étudier cette relation pluie-débit à l'échelle quotidienne et de comparer les résultats obtenus avec ceux découlant de l'étude mensuelle.

Nous avons utilisé le modèle AMANDE [5]. Il s'agit également d'un modèle global à réservoirs ; un peu plus complexe que le modèle GARDENIA, il fait intervenir 14 paramètres et travaille au pas de temps journalier (annexe VI.2).

La confrontation des courbes de pluies et débits journaliers (fig. VI.16 et VI.17) observés en 1981 et 1982, illustre la réponse immédiate du bassin ; les fortes précipitations se manifestent par des pics de crue le jour même.

On note cependant une dizaine de décalages entre ces pluies et des débits ; de fortes pluies considérées le jour j n'occasionnent une crue que le jour $j+1$. Ceci est dû au fait que les pluies ont jusqu'alors été considérées de 7 h le jour j à 7 h le jour $j+1$ (Service Météorologique de La Réunion).

Les précipitations intervenant entre 0 et 7 h le jour $j+1$ sont comptabilisées au jour j . Tenant compte du temps de réponse du bassin, environ 1 h, nous avons préféré considérer comme hauteur de pluie du jour j , les précipitations tombant de 23 h le jour $j-1$ à 23 h le jour j .

Cette correction effectuée, la confrontation des deux séries montre bien qu'il n'existe pas une relation simple entre la pluie et le débit au pas de temps journalier. La pluviosité des jours et des mois précédents, ainsi que l'évapotranspiration potentielle, conditionnent l'état de saturation du sol et des différents réservoirs souterrains donc également le débit de la ravine avant l'épisode considéré.

La comparaison des différents débits journaliers correspondant à des pluies journalières d'environ 30 mm qui interviennent tout au long de l'année, illustre bien ce phénomène.

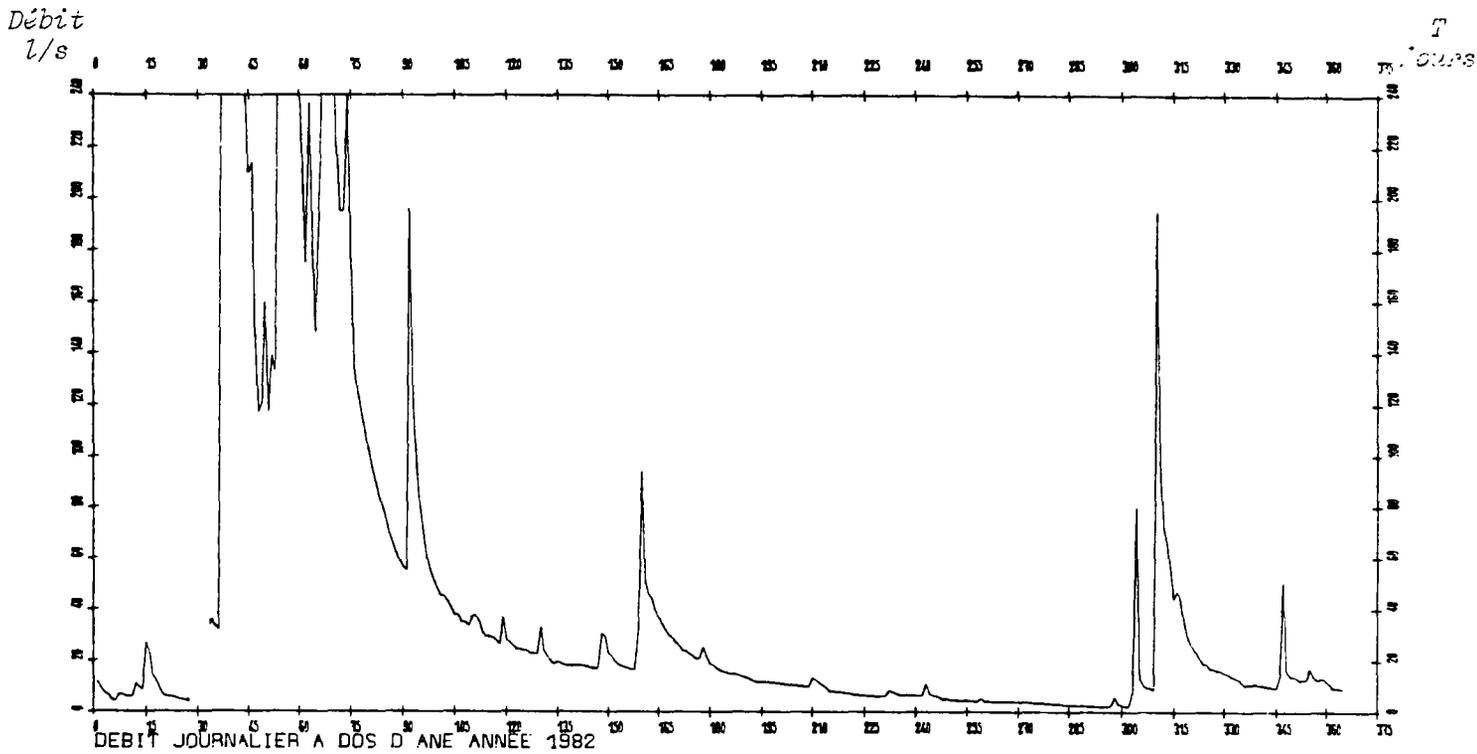
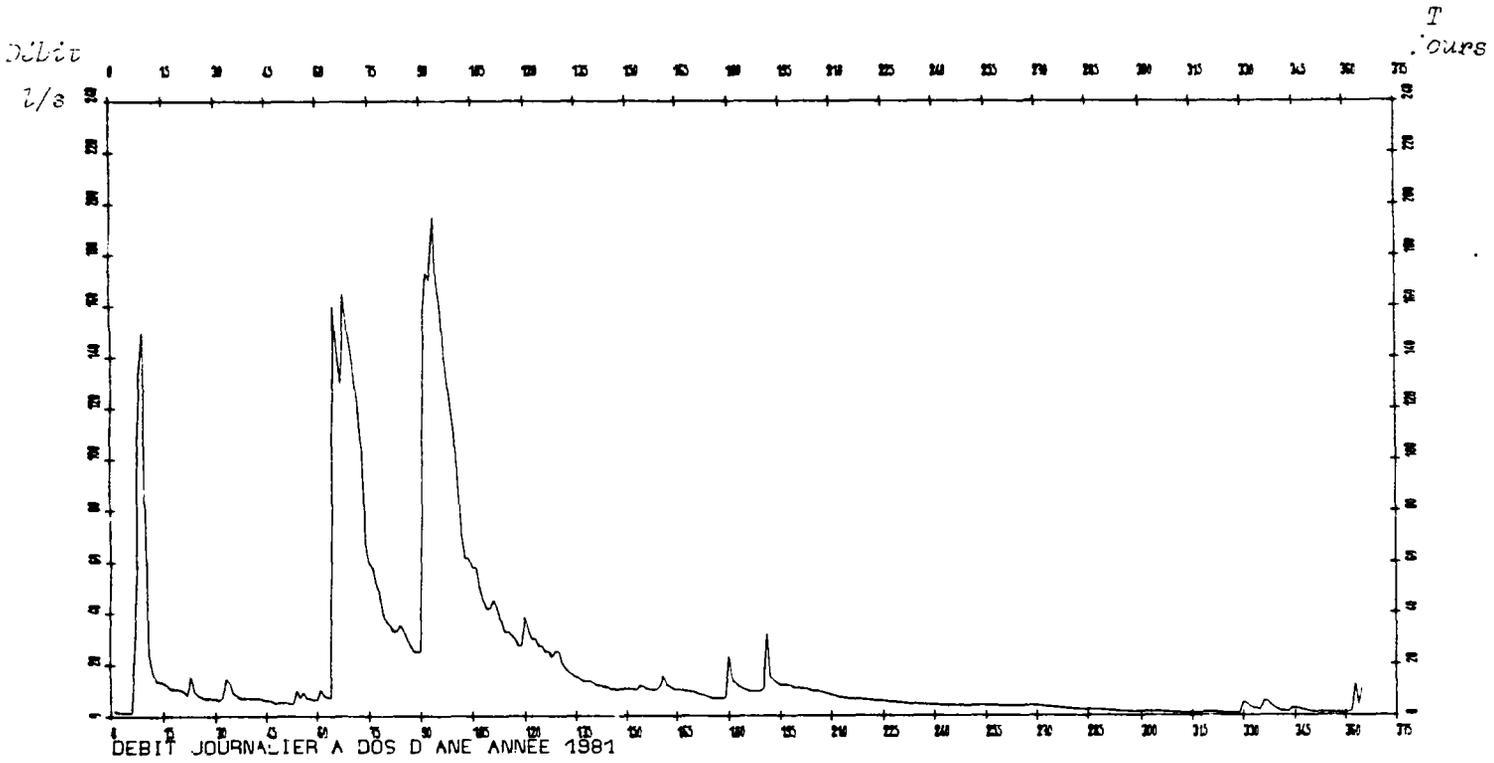
Dates	Pluie (en mm)	Débit (en l/s)
23.02.1981	39.5	10.1
29.06.1981	27	23
17.07.1981	28	31.8
02.12.1981	32	5.8
12.12.1981	25	11
15.01.1982	35	27
19.02.1982	28	160
04.03.1982	34.5	237
15.03.1982	28	240
28.05.1982	22.5	30.7

L'utilisation des modèles globaux schématisant la recharge et la vidange de différents réservoirs permet d'intégrer ces différents phénomènes, de mieux cerner la relation pluie-débit et d'identifier les différents termes du bilan hydrologique.

Le critère d'ajustement entre série observée et calculée est de -0.983 (obtenu d'après 741 valeurs), la superposition graphique de ces deux séries de débits (fig. VI.18) témoignent également d'un bon ajustement. Dans les deux cas cependant, les fortes valeurs jouent un rôle considérable, la bonne simulation de celles-ci masque la simulation un peu plus médiocre des faibles valeurs. L'ajustement au pas de temps journalier est beaucoup plus fiable que celui réalisé au pas de temps mensuel, car bien qu'on ne dispose que de 2 ans dans les 2 cas, on a ici un ajustement sur 741 valeurs, contre 24 précédemment.

Les successions de pics de crues et décrues sont dans l'ensemble bien restituées. Seules les petites pointes du 02 avril 1982 et du 31 octobre 1982 sont totalement ignorées par le modèle. A l'opposé, les débits calculés en période de décrue ou de tarissement sont supérieurs à ceux observés.

Le comportement hydrologique du bassin semble bien restitué par le modèle et un des premiers enseignements tiré de cette simulation est la très forte proportion de pluie qui échappe au contrôle de la ravine sans doute par infiltration profonde ; résultat tout à fait similaire à celui obtenu par le modèle mensuel.



— valeurs observées

FIG. VI.17 - Débits journaliers de la Ravine à Marquet à Dos d'Ane (années 1981 et 1982)

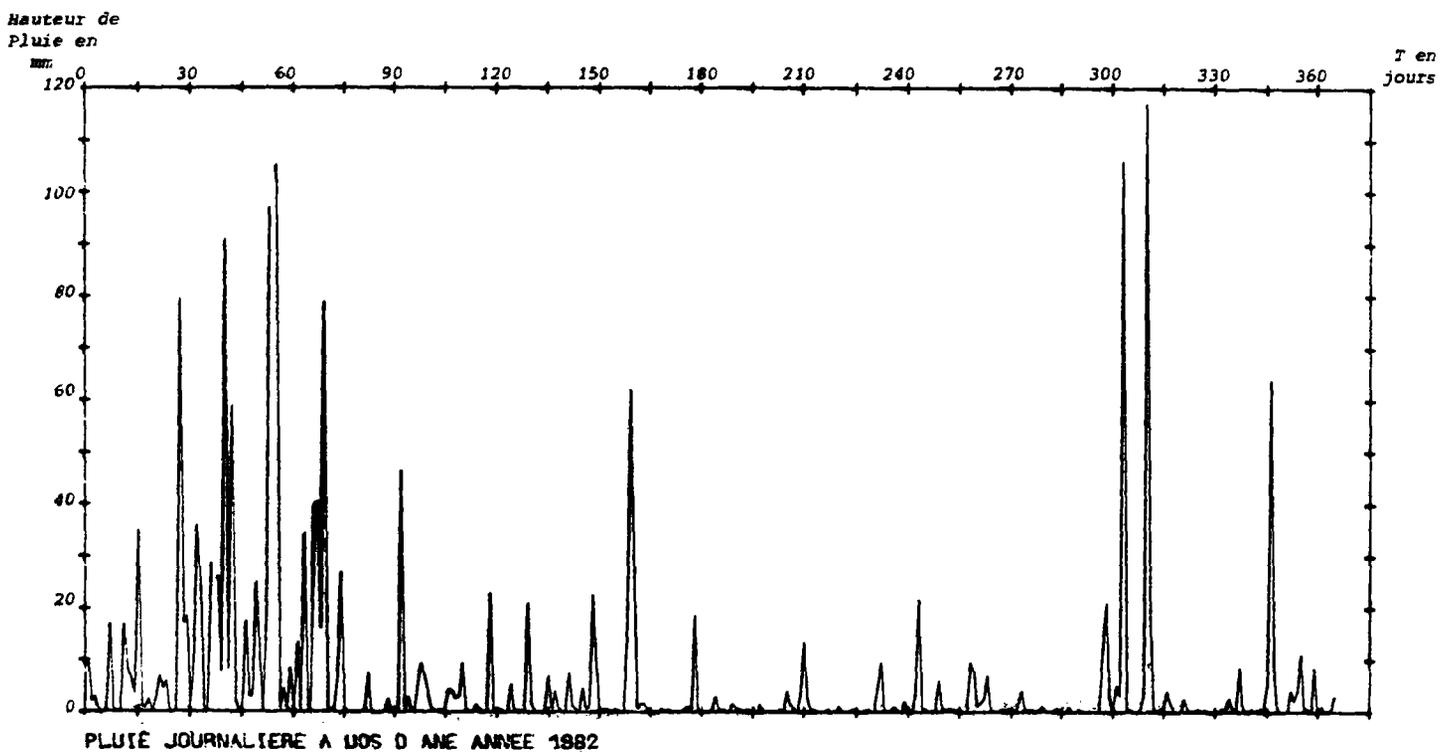
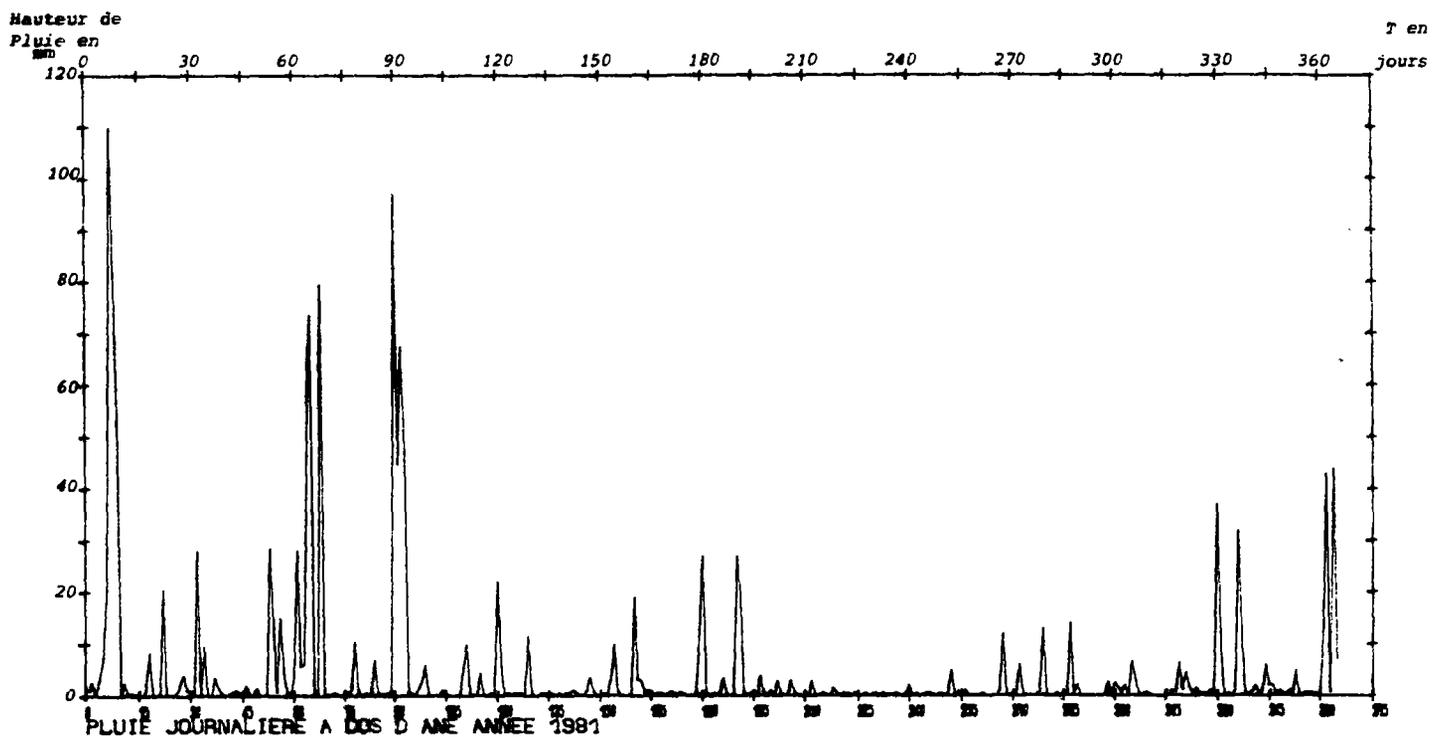


FIG. VI.16 - Hauteur journalière de pluie au poste de Grand Coin
Année 1981 et 1982

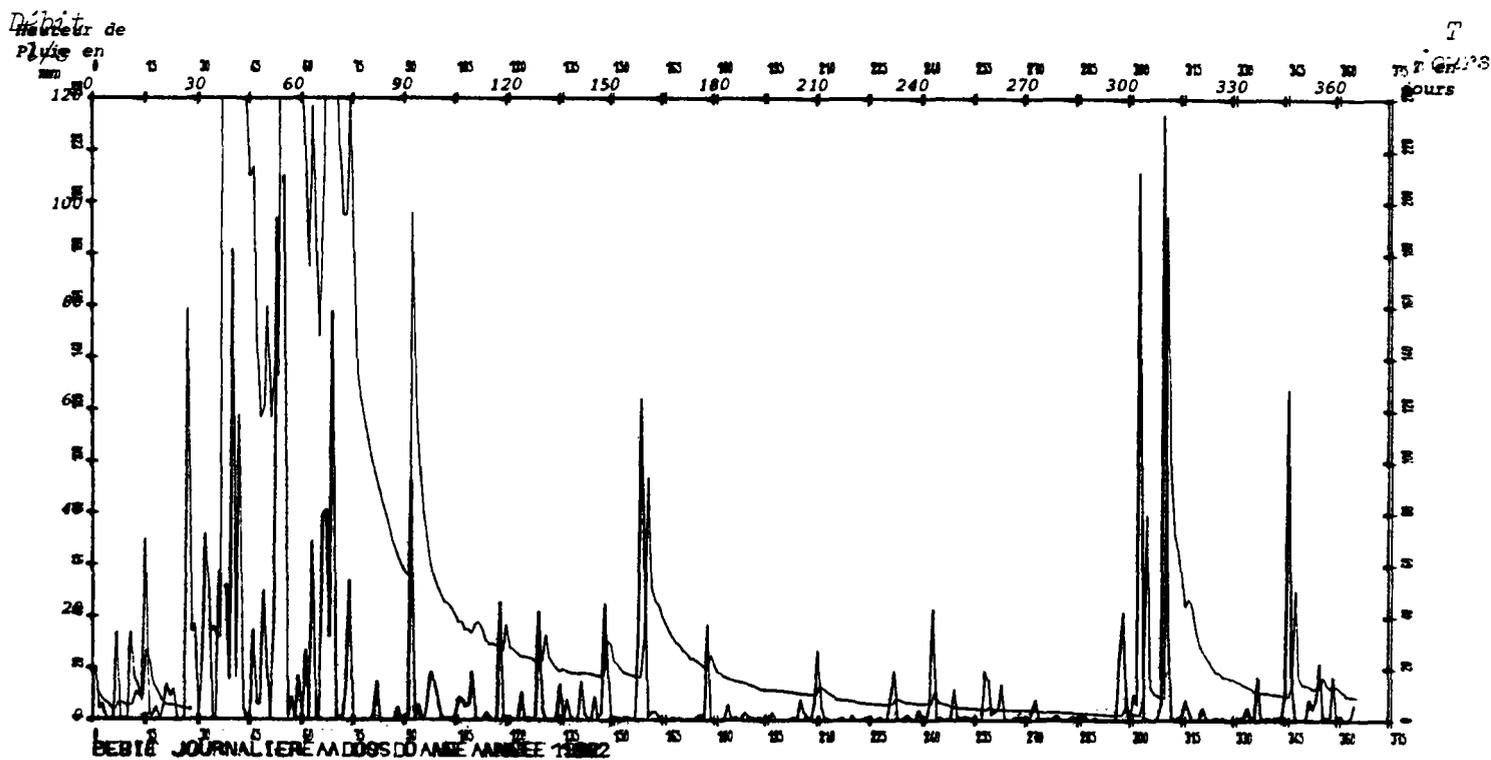
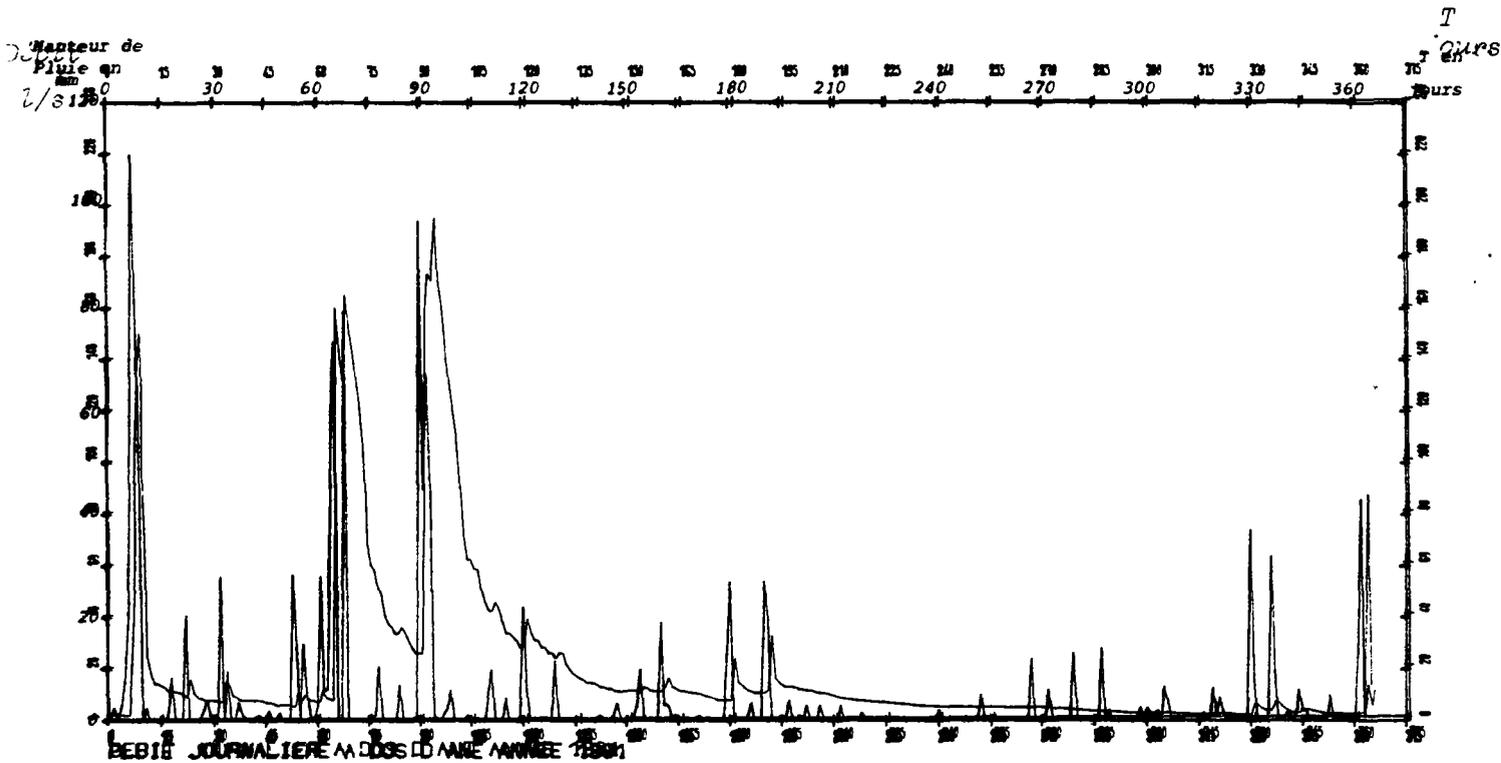


FIG. VI.15 - Débit journalier de pluie à Gagns (Années 1981 et 1982)

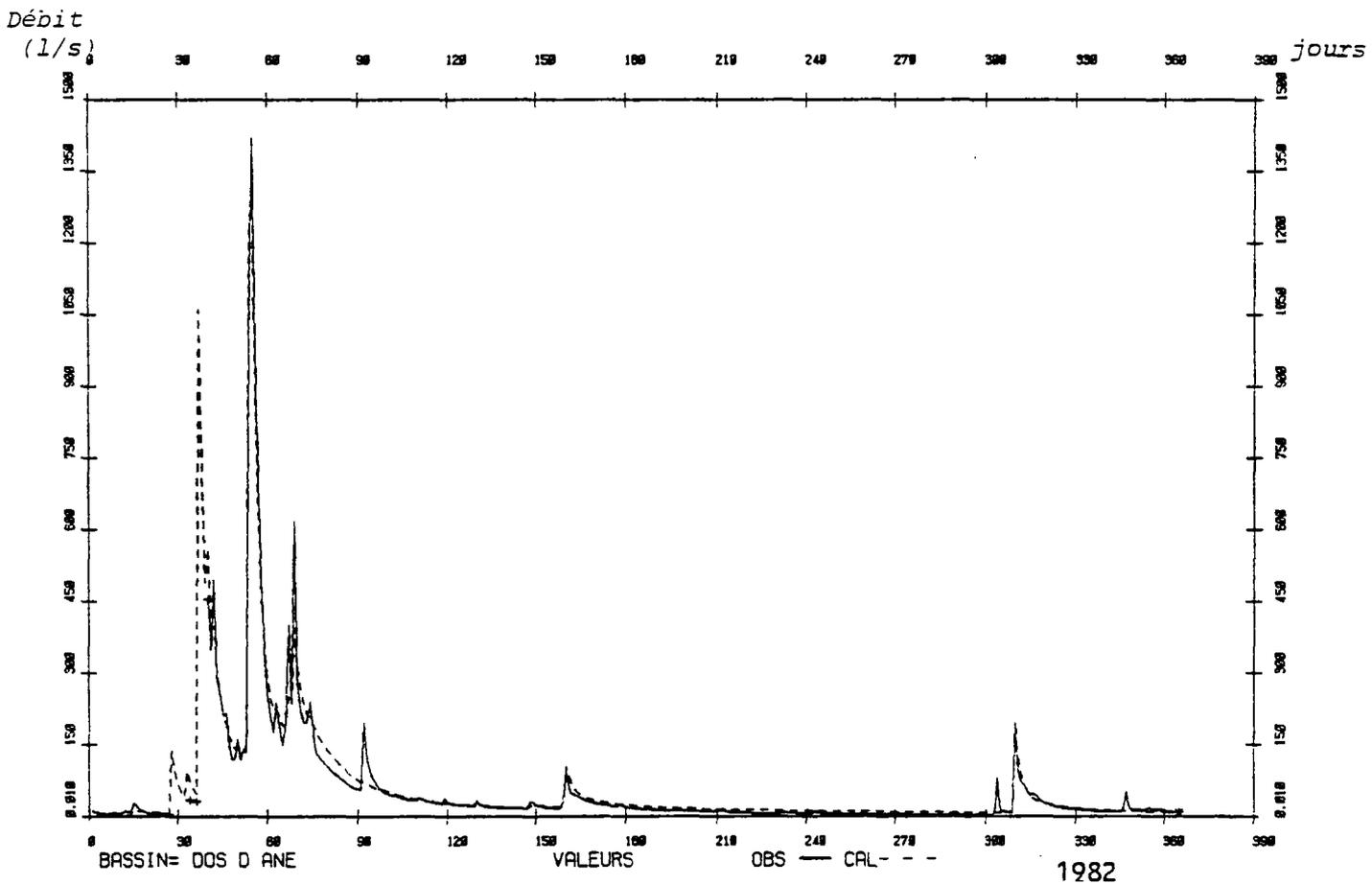
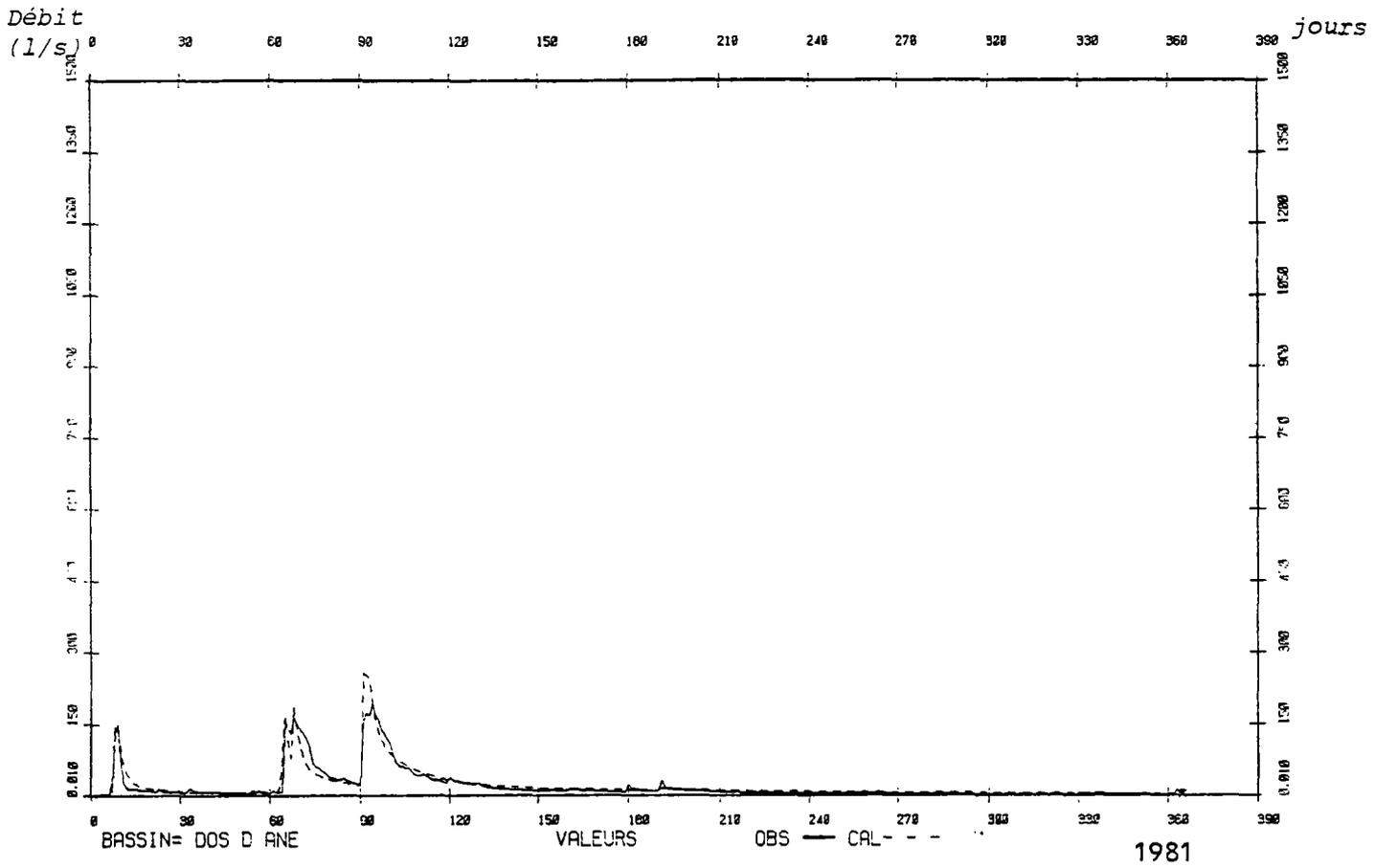


FIG. VI.18 - Simulation des débits journaliers de la ravine à Marquet par le programme AMANDE

En effet, l'optimisation de la surface du bassin versant conduisant à la meilleure simulation obtenue donne 1,31 km² contre 2,32 km² pour la surface du bassin versant topographique (fig. VI.12). La pluie efficace tombant sur seulement 56 % de la surface effective du bassin est contrôlée à l'exutoire du bassin. En contrepartie, on peut considérer que près de la moitié de la pluie efficace s'infiltré profondément au niveau du bassin.

TABLEAU VI.15 - Simulation des débits de la ravine à Marquet, par modèle à pas de temps journalier

Paramètres			Optimisation avec surface imposée
Capacité réservoir sup.	mm	144.92	148.93
Seuil de ruissellement	mm	25.47	31.2
Capacité réservoir l	mm	294.47	367.4
Rétention réservoir l	mm	44.41	16.2
Tariss. aquifère inf.	jour	82.28	163.1
Tariss. aquifère sup	jour	10.38	90.0
Tariss. hypod.	jour	14.89	43.9
Tariss. superficiel	jour	2.44	3.2
Retard percolation	jour	105.79	103.7
Seuil aquifère sup.	mm	1 499.87*	1 500.
Exposant ETP		1.05	1.5
Pourc. aquif. semi-perm.		43.25	39.9
Coefficients pointes		79.27	84.1
Temps percolation	jour	68.23	7.6
Surface	km ²	1.31	2.33*
Critère d'ajustement (741 valeurs)		- 0.983	0.875

* imposé

En imposant la surface, on obtient une simulation beaucoup plus mauvaise.

On note également une correspondance entre les résultats des différents modèles au niveau de la réserve superficielle du sol dans laquelle puisent les plantes en période sèche. Elle a été optimisée à 150 mm environ, cette valeur relativement élevée permet à l'évapotranspiration réelle d'être le plus souvent égale à l'évapotranspiration potentielle. Octobre et novembre 1981 sont les deux exceptions (tableau VI.16).

TABLEAU VI.16 - Simulation de la ravine à Marquet par modèle global à pas de temps journalier; les valeurs mensuelles et annuelles des différents termes du bilan d'eau, exprimées en mm.

ANNEE 1981

MOIS*	PLUIE	DEBIT	DEBIT	ECOUL	ECOUL	ECOUL	EAU	EAU	ETP	ETR	INFIL	PLUIE	RESER
	MM	OBS.	CAL.	SUPERF	HYPOD.	BASE I	LIEE	MOBILE	MM	MM	MM	EFFIC.	SOUT
	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM
JAN	370.	40.	53.	27.	20.	6.	44.	92.	99.	99.	11.	63.	28.
FEV	111.	13.	11.	0.	4.	7.	44.	102.	89.	89.	10.	10.	37.
MAR	282.	128.	108.	40.	54.	14.	44.	198.	84.	84.	43.	148.	65.
AVR	310.	161.	178.	45.	109.	24.	44.	213.	73.	73.	47.	204.	116.
MAI	30.	36.	43.	0.	15.	28.	44.	154.	68.	68.	25.	25.	129.
JUN	84.	21.	26.	0.	2.	24.	44.	120.	60.	60.	15.	15.	116.
JUL	68.	23.	24.	0.	3.	21.	44.	104.	59.	59.	11.	15.	98.
AOU	10.	11.	18.	0.	1.	18.	44.	90.	66.	66.	8.	8.	82.
SEP	29.	8.	14.	0.	0.	14.	44.	77.	69.	69.	6.	6.	66.
OCT	40.	5.	12.	0.	0.	12.	44.	67.	81.	65.	5.	5.	53.
NOV	75.	3.	9.	0.	0.	9.	44.	48.	86.	59.	2.	2.	42.
DEC	173.	6.	7.	0.	0.	7.	44.	40.	90.	90.	2.	2.	31.
ANN	1581.	455.	502.	111.	207.	184.	44.	109.	925.	882.	185.	503.	72.

ANNEE 1982

MOIS*	PLUIE	DEBIT	DEBIT	ECOUL	ECOUL	ECOUL	EAU	EAU	ETP	ETR	INFIL	PLUIE	RESER
	MM	OBS.	CAL.	SUPERF	HYPOD.	BASE I	LIEE	MOBILE	MM	MM	MM	EFFIC.	SOUT
	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM	MM
JAN	254.	15.	33.	14.	12.	5.	44.	61.	95.	95.	5.	59.	25.
FEV	1115.	553.	716.	422.	282.	12.	44.	230.	87.	87.	52.	951.	61.
MAR	270.	350.	376.	37.	311.	28.	44.	230.	87.	87.	57.	239.	127.
AVR	130.	101.	87.	0.	55.	32.	44.	182.	76.	76.	34.	43.	152.
MAI	90.	44.	43.	0.	12.	31.	44.	146.	68.	68.	23.	33.	144.
JUN	131.	57.	69.	9.	32.	29.	44.	174.	63.	63.	31.	72.	137.
JUL	35.	25.	36.	0.	7.	29.	44.	143.	60.	60.	22.	22.	135.
AOU	47.	15.	26.	0.	1.	25.	44.	114.	67.	67.	14.	14.	117.
SEP	46.	9.	20.	0.	0.	20.	44.	94.	72.	72.	9.	9.	96.
OCT	155.	11.	17.	0.	0.	17.	44.	81.	81.	81.	7.	7.	77.
NOV	156.	66.	67.	23.	29.	15.	44.	128.	86.	86.	17.	76.	71.
DEC	121.	27.	21.	0.	6.	16.	44.	113.	92.	92.	13.	13.	72.
ANN	2548.	1273.	1512.	506.	748.	258.	44.	141.	932.	932.	282.	1537.	101.

Les lois régissant les transferts d'eau entre les différents réservoirs ne sont pas identiques dans les deux modèles étudiés, il n'est pas possible de comparer les différents paramètres (notamment les temps de tarissement). On observe cependant qu'au niveau de la décomposition

des différentes formes d'écoulement, on obtient des résultats très proches :

- On note une prédominance de l'écoulement "hypodermique" (réservoir peu profond à vidange rapide) qui, sans être aussi important que dans le modèle mensuel, constitue à lui seul 50 % de l'écoulement. Celui-ci est surtout important les mois pluvieux et les mois suivants.
- La répartition entre ruissellement et écoulement "de base" dépend de la hauteur de pluie. En 1981, année peu pluvieuse, le ruissellement représente 20 % de l'écoulement total ; en 1982, 30 %. Au niveau mensuel, il n'intervient que lors des épisodes pluvieux importants (janvier, mars, avril 1981 - janvier, février, mars, novembre 1982). Sur les deux années observées, l'écoulement de base présente une distribution avec un maximum en fin de saison des pluies (avril, mai) et un minimum en début de saison des pluies (janvier). Bien que plus important en valeur absolue en années plus humide, sa participation relative à l'écoulement total est au contraire plus élevée en années moins pluvieuses.

2.4. Fonctionnement hydrologique du bassin de la ravine à Marquet

Sur le plan du fonctionnement hydrologique du bassin de la ravine à Marquet, ces différents modèles montrent que deux réservoirs distincts soutiennent les débits de cette rivière, que l'écoulement superficiel ne constitue qu'une faible proportion de l'écoulement malgré la violence apparente des crues (débit spécifique maximum de crue observé de $4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) et que par contre une très forte proportion de la pluie efficace ($\approx 50 \%$) échappe au contrôle dans la ravine.

Nous allons revenir successivement sur ces différents points.

2.4.1. Etude du tarissement

Les pluies importantes sont suffisamment disséminées pour que le plus souvent la décrue et le tarissement se fassent en régime non influencé (fig. VI.17) ; on observe effectivement un tarissement en deux phases.

FIG. VI.19 - Etude du tarissement de la ravine à Marquet -
 Report en coordonnées semi-logarithmiques des principales phases de
 décrues et de tarissement

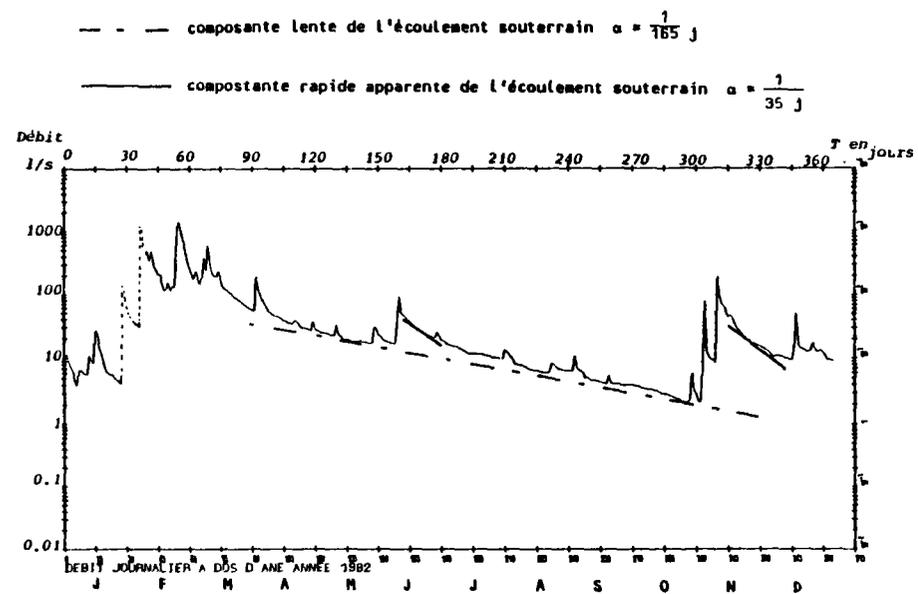
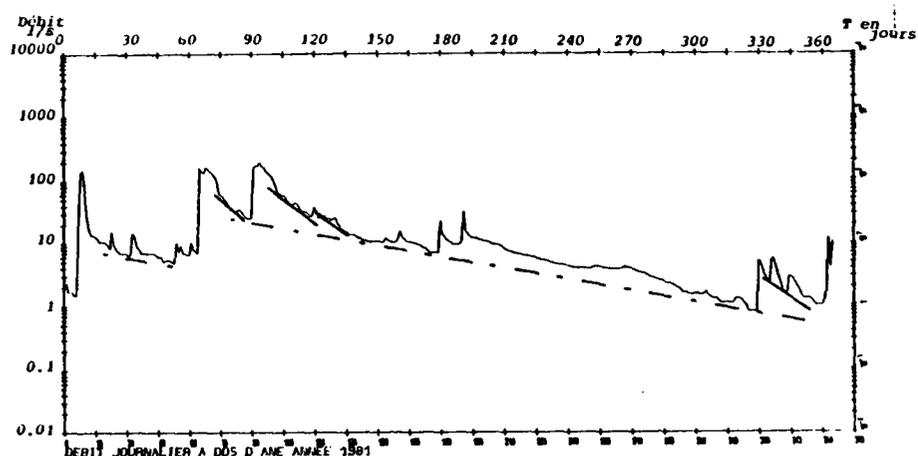
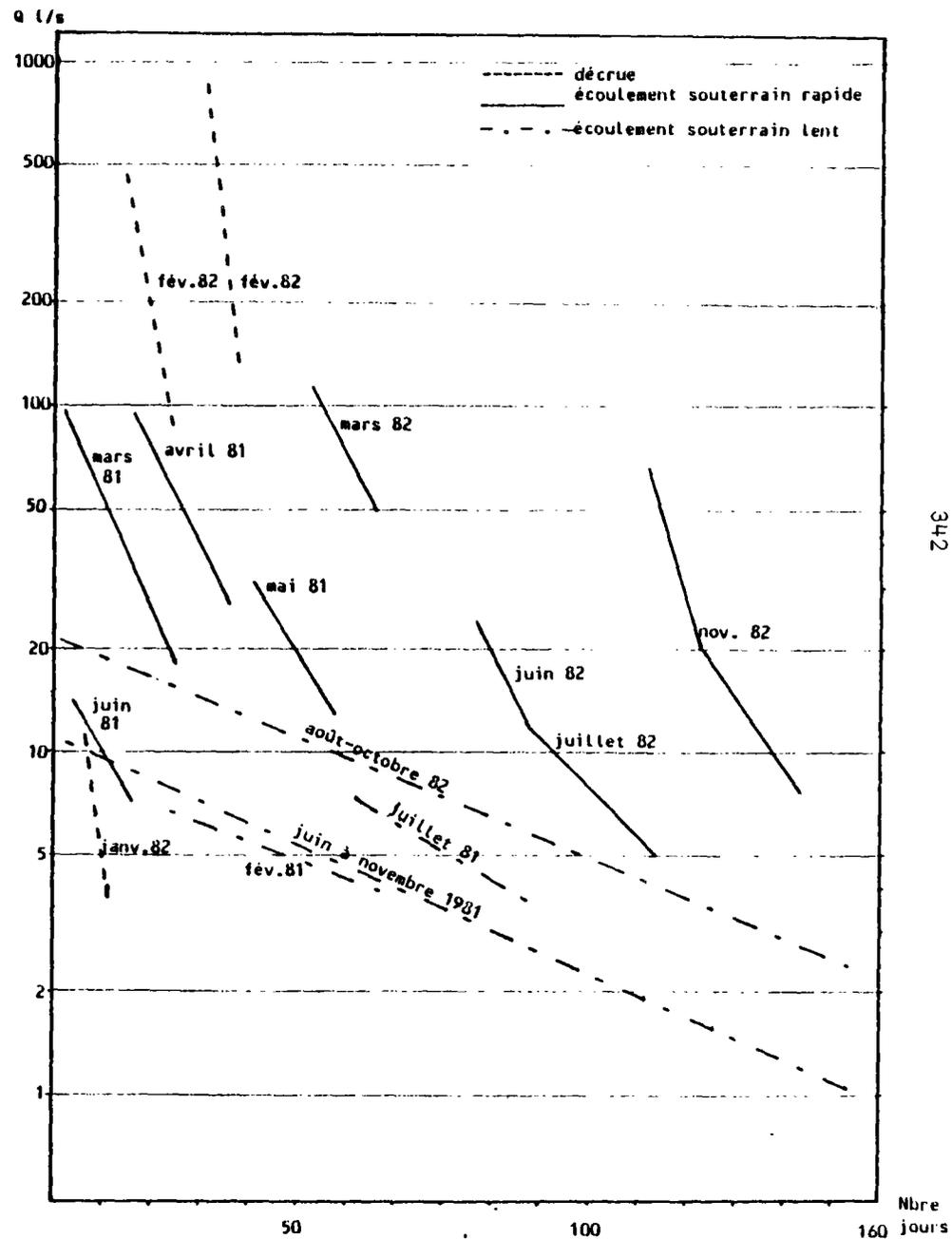


Figure 8 - Etude du tarissement de la ravine à Marquet



Ce phénomène apparaît plus nettement encore sur une représentation sur papier semi-logarithmique (fig. VI.19) en considérant que le tarissement suit une loi du type : $Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$.

Une composante lente de l'écoulement souterrain intervient nettement chaque année pendant la saison sèche de mai à novembre 1981 et d'avril à octobre en 1982 (fig. VI.19 A). Le coefficient α est de l'ordre de 1/160 jours ($\alpha_3 = 7.23 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$). Cette composante apparaît seule un à deux mois après les précipitations importantes de la saison des pluies. Pendant cette période suivant les fortes pluies, on peut distinguer en coordonnées semi-logarithmiques deux familles de droites consécutives (fig. VI.19 B) que l'on peut assimiler à une phase de décrue qui ne se manifeste que pendant quelques jours et à une composante rapide de l'écoulement souterrain. Ces deux phases sont influencées par la composante lente de l'écoulement souterrain précédemment déterminée et on ne calcule que les valeurs apparentes des coefficients de tarissement soit respectivement environ 1/8 jours et 1/35 jours, ou encore $\alpha_1 = 1.45 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ et $\alpha_2 = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

Nous avons par ailleurs mis en évidence l'existence de deux niveaux aquifères au niveau de ce bassin (§ 2.1.), un au sein des formations anciennes du Piton des Neiges qui se manifeste par une ligne d'émergence au niveau milieu du rempart, un aquifère superficiel au fond de la cuvette de Grand Coin. Ces aquifères ont une disposition géographique originale sur ce bassin, puisque vraisemblablement l'aquifère à faible débit et tarissement lent est à l'amont du réservoir à vidange rapide qui assure l'essentiel des débits de la ravine.

Pendant la période de tarissement (supposée exponentielle), le volume d'eau W emmagasiné dans les réservoirs souterrains au temps t s'exprime en fonction du débit $Q(t)$ correspondant sous la forme :

$$W = Q(t) / \alpha$$

Ainsi en fin d'étiage de l'année 1981, le débit de la ravine était de l'ordre du l/s. Les réserves correspondantes étaient de $13,8 \cdot 10^3 \text{ m}^3$; fin 1982, un débit 10 fois supérieur correspond à des réserves également 10 fois supérieures. Pendant l'année 1982, on peut considérer une recharge de ces réserves souterraines de l'ordre de $125 \cdot 10^3 \text{ m}^3$,

chiffre cependant négligeable devant le volume d'eau apporté par les pluies pendant cette année ($5899 \cdot 10^3 \text{ m}^3$).

2.4.2. Etude sommaire des crues

Sur la représentation des débits journaliers (fig. VI.17), on note d'assez nombreuses crues de durée et d'importance variables qui sont intervenues tout au long de ces deux années.

Le déphasage entre les pointes correspondantes de la pluie et du débit se situe dans la majorité des cas dans l'intervalle de 1 h à 1 h 30, ce qui paraît logique au vu de la dimension et la morphologie du bassin.

Dans le cas de saturation du sol ou d'épisodes très intenses (voire de précipitation intéressant d'abord l'amont du bassin), le temps de réponse diminue, il serait inférieur à la demi-heure le 10 mars 1982 (annexe VI.3). De même le temps de montée est d'autant plus bref que l'intensité de la pluie est élevée. Dans le cas d'averses brèves et intenses, temps de réponse et temps de montée sont pratiquement équivalents, il est de l'ordre de 40 minutes le 10 mars 1982 (annexe VI.3) et le 6 novembre 1982. Dans le cas d'averses plus longues et irrégulières, il peut dépasser 2 heures (13 décembre 1982).

Nous avons étudié quatre épisodes de crues (annexe VI.3) qui représentent la majorité des exemples relevés pendant ces deux années : deux épisodes de saison des pluies, un important et long correspondant à deux jours de fortes précipitations (23-24 février 1982), un bref et très violent correspondant à une très forte intensité pluviométrique (10 mars 1982) et deux épisodes de saison sèche correspondant à des hauteurs de pluies à peu près équivalentes (100 mm) mais d'intensité plus élevée le 6 novembre 1982 que les 8 et 9 juin 1982.

Si les crues de la ravine à Marquet peuvent être très violentes (débit instantané atteignant $10 \text{ m}^3/\text{s}$) elles sont aussi très fugaces et le volume d'eau correspondant au ruissellement superficiel ne représente qu'une faible proportion du volume de pluie efficace ; même

dans des conditions pratiquement optimales de saturation du sol ou lors de pluies très intenses, ce rapport n'atteint pas 25 %. En période plus sèche, il peut par contre descendre en-dessous des 5 %.

Les conditions de saturation du sol avant l'épisode pluvieux considéré jouant un rôle primordial dans la répartition de la pluie efficace, entre ruissellement superficiel et transit de l'eau par le sous-sol. L'intensité de la pluie (à un pas de temps inférieur à l'heure) conditionne essentiellement le débit maximal instantané et la forme de l'hydrogramme, mais n'agit pratiquement pas sur la proportion d'eau ruisselant à la surface du sol.

Les débits évoluent très rapidement au cours d'une crue et une étude précise nécessiterait un pas de temps de quelques minutes. Il apparaît néanmoins que même lors des épisodes pluvieux intenses une très forte proportion de l'eau transite par le sol et le sous-sol favorisant ainsi les pertes par infiltration profonde.

2.4.3. Mesures diverses des écoulements souterrains en aval de l'écoulement du secteur de Dos d'Ane

La simple confrontation des lames d'eau écoulées et des hauteurs de pluies sur le bassin de la ravine à Marquet montre la faible proportion d'écoulement superficiel de ce secteur.

L'emploi de modèles globaux de simulation hydrologique confirme ce phénomène et mettent en évidence une proportion équivalente aux écoulements, de perte par infiltration profonde.

Il n'est pas possible de mesurer par ailleurs ces pertes et d'ainsi équilibrer le bilan obtenu. Cependant certaines observations tendent à prouver l'existence de ces phénomènes d'infiltration profonde dans ce secteur :

- L'aquifère multicouche de la plaine des Galets, en aval de la ravine à Marquet (fig. VI.11) a fait l'objet de diverses études. Son fonctionnement simulé par modèle analogique suppose une alimentation latérale par le secteur amont (plateau de Ste-Thérèse - Dos d'Ane) équivalente à un débit moyen annuel de 1,1 m³/s.

- Les sources Blanche et Denise apparaissent au pied des remparts de la rive droite de la rivière des Galets (fig. VI.11). D'après leur position, leur aire d'alimentation doit recouper le secteur de Dos d'Ane. Leur débit moyen cumulé est de 60 l/s environ [3].
- Les différentes sources captées au niveau du bassin ou juste à l'aval, c'est-à-dire les sources Piton Fougères, Barois et Galet Rond (fig. VI.12) présentent des débits assez faibles. D'après les relevés effectués par la Compagnie Générale des Eaux qui exploite ces différentes sources, le débit moyen cumulé de ces sources est en effet de 9 l/s.

La proportion des eaux infiltrées mesurées aux exutoires naturels des différents aquifères paraît très faible vis-à-vis des eaux qui transitent jusqu'à l'océan par le sous-sol (succession de "réservoirs perchés" s'alimentant en cascade jusqu'aux nappes côtières - cf 1re partie, § 1.3) et dont l'approche est beaucoup plus délicate.

2.4.4. Conclusions relatives à l'utilisation des modèles globaux à réservoirs

L'utilisation des modèles globaux sur le bassin versant du Dos d'Ane permet de bien reproduire les variations de débits observés tant au plan mensuel que journalier. Ils donnent en outre différents résultats :

- Les données climatiques utilisées (pluie et évapotranspiration) semblent bien définies ;
- La réserve en eau du sol paraît globalement élevée au niveau du bassin : 150 à 200 mm ;
- Deux réservoirs soutiennent les débits de la ravine à Marquet. Un premier à vidange rapide assure l'essentiel des débits, un second contribuant pour un faible volume, mais présentant une vidange assez lente, empêche le tarissement total de la rivière. Ces phases successives de tarissement apparaissent nettement sur le tracé des débits journaliers observés (fig. VI.17 et VI.19) et deux réservoirs géographiquement distincts ont effectivement été observés.

- Le ruissellement superficiel n'est effectif que quelques mois dans l'année suite aux fortes précipitations et les crues parfois très violentes ($4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) sont fugaces. Il ne constitue qu'une faible proportion de l'écoulement.
- Une très forte proportion d'eau (50 % de la pluie efficace environ) échappe au contrôle à l'exutoire par infiltration profonde au niveau du bassin et participe ainsi à l'alimentation des sources et nappes côtières à l'aval.

Il conviendra cependant de vérifier le bon fonctionnement des modèles sur les années à venir, surtout dans le cas d'années exceptionnelles. Deux années de calage constituent un échantillon trop court pour assurer l'unicité de la combinaison des paramètres. La qualité des ajustements obtenus est cependant le gage de la fiabilité de ces résultats.

En ce qui concerne l'évaluation des différents termes du bilan d'eau et de la prépondérance de telle ou telle composante de l'écoulement, les modèles GARDENIA (pas de temps mensuel) et AMANDE (à pas de temps journalier) donnent des résultats tout à fait comparables.

En fait, si les épisodes pluvieux sont d'ordre journalier, voire horaire, leur caractère saisonnier est tout de même manifeste et, à la succession de saison des pluies - saison sèche, correspond un régime de débits, simple de type pluvial tropical, selon la classification de PARDE que les modèles fonctionnant à pas de temps mensuel sont tout à fait aptes à décrire.

2.5. Etude de la piézométrie du forage de Grand Coin

2.5.1. Evolution générale

Nous disposons des données piézométriques du forage de Dos d'Ane sur les 9 derniers mois de l'année 1982. Son suivi a débuté fin mars 1982 après les très fortes pluies de février et mars (1400 mm). Depuis cette date, la tendance générale de l'évolution du niveau piézométrique (fig. VI.20) est à la baisse avec cependant quelques remontées dont les plus

nettes sont celles de mi-juin et surtout de début novembre 1982 ; cette baisse est d'un mètre par mois en avril-mai, elle s'est stabilisée à 1 m pour deux mois d'août à octobre, la fluctuation maximale observée jusqu'alors n'atteint pas 5 mètres.

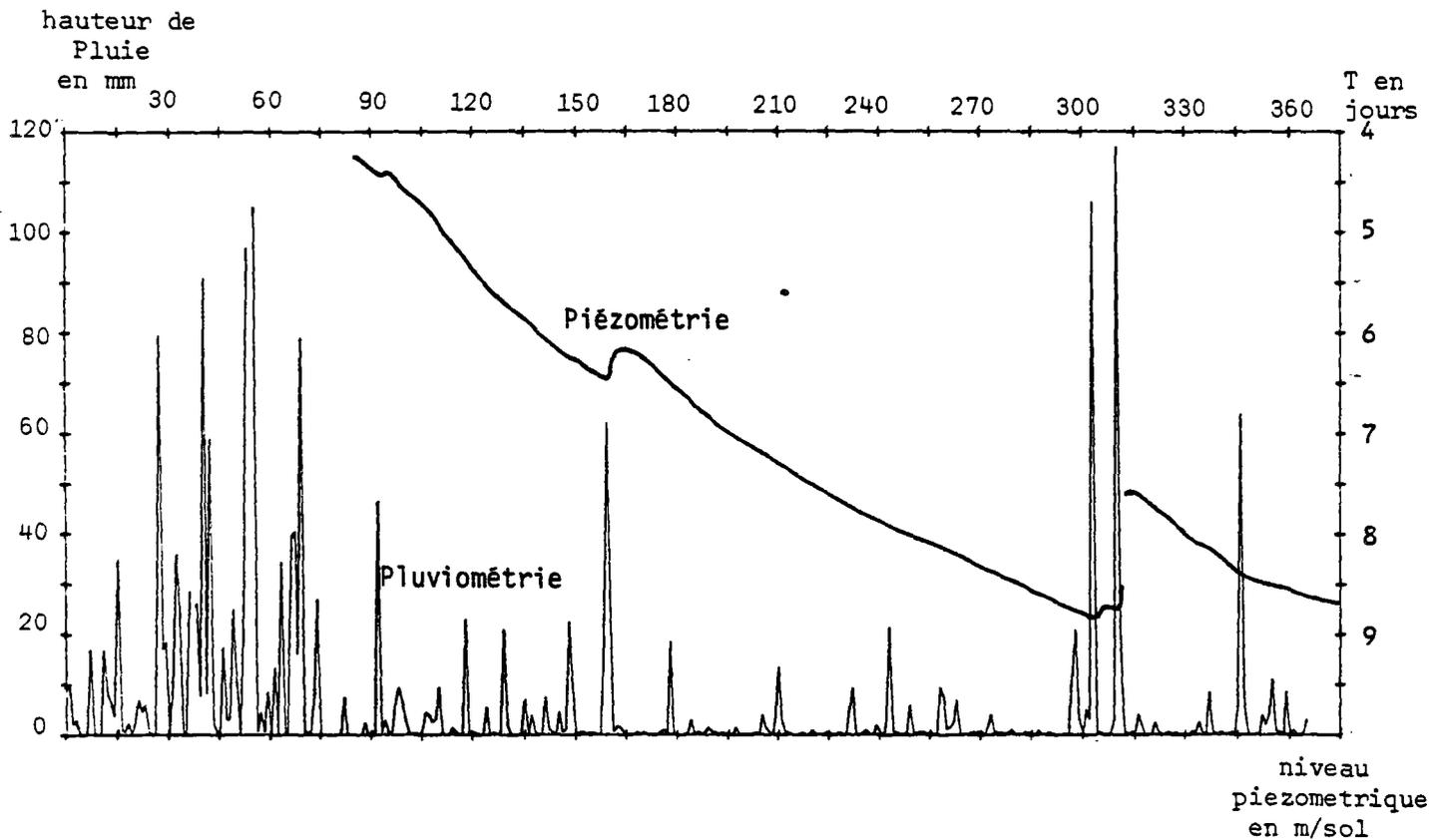


FIG. VI.20 - Evolution comparée de la pluviométrie et piézométrie journalière à Grand Coin, en 1982

2.5.2. Etude des épisodes de remontées de niveau

Si de petites influences, voire de légères remontées, perturbent la baisse régulière du niveau, seuls les épisodes pluvieux de juin et novembre ont entraîné des remontées notables du niveau.

Remontée de Juin.

Nous avons précédemment (§ 2.4.2.) étudié la crue relative à l'épisode pluvieux des 8 et 9 juin 1982. Cette pluie a également entraîné une remontée du niveau piézométrique. Si dès le début de la pluie du 8 au matin, on note une baisse moins prononcée du niveau, il faut attendre le 9 (vers 8 h) pour assister au début de la remontée ; celle-ci se poursuit pendant 5 jours surtout effective pendant 2 jours, le maximum est atteint dans la matinée du 14, le niveau est remonté de 28,5 cm (45 cm si l'on tient compte que la baisse se serait poursuivie). Le niveau retrouve son état initial au bout de 15 jours, mais cet épisode pluvieux exerce certainement une influence jusqu'au début août (inflexion nette de la courbe piézométrique - fig. VI.20).

Remontée de Novembre.

Cet épisode correspond également à une crue de la ravine à Marquet. Une longue remontée intervient le 31 octobre vers 3 h du matin et se poursuit jusque vers 12 h le 1er novembre.

La pluie a surtout été importante du 30 (18 h) au 31 (4 h), mais les premières précipitations remontent au 29 (0 h).

La remontée la plus notable débute le 6 novembre vers 8 h, les pluies sont très importantes de 6 à 10 h (100 mm), remontée de 50 cm en 12 h, le niveau maximum semble être de 7,57 m (remontée de 1,15 m), mais l'enregistreur était bloqué en limite supérieure. Après quelques jours de stabilisation, la baisse est assez rapide jusqu'au 15 décembre. Plus lente, ensuite la baisse se poursuit jusqu'à la mi-janvier, le niveau est alors analogue à celui de fin octobre.

Ces trois épisodes pluvieux (d'environ 100 mm) ont exercé des influences très variées sur le niveau :

- En juin, le niveau est encore assez haut, nous sommes en début de saison sèche, les pluies sont réparties sur plus de 24 h, la remontée est assez faible et lente : la saturation progressive des premiers centimètres du sol peut expliquer ce phénomène.

- Fin octobre, la pluie est violente, mais intervient après 4 mois de très faibles pluies, la remontée est rapide, mais très faible, cette pluie est presque totalement absorbée par la réserve superficielle du sol.
- Début novembre, intervenant après celles d'octobre, les pluies violentes entraînent une remontée brutale et assez élevée du niveau ; saturée par les pluies d'octobre, la réserve en eau du sol laisse transiter les eaux de percolation vers l'aquifère. Il est possible également que la porosité efficace soit plus faible à ce niveau, d'où une remontée plus importante du niveau par un apport équivalent.

On constate que les précipitations journalières de l'ordre de 10 à 20 mm relevées de juillet à octobre n'ont apparemment pas alimenté cette nappe, alors que les débits de la ravine ont réagi, faiblement il est vrai, à ces pluies.

La capacité de rétention en eau du sol lorsqu'elle est partiellement asséchée entravent davantage les phénomènes d'infiltration que ceux de ruissellement superficiel.

2.5.3. Essai de simulation

La tendance générale du niveau piézométrique à la baisse ainsi qu'une chronique restreinte de mesures ne sont pas des conditions optimales pour utiliser des modèles de simulation. Cependant, les modèles utilisés permettent indifféremment la simulation de débits ou de niveau de nappe. Nous avons donc utilisé le modèle journalier AMANDE (un calage sur 8 valeurs mensuelles n'aurait guère de signification) pour simuler l'évolution du piézomètre, en imposant le jeu de paramètres permettant une bonne simulation des débits.

Avec cette solution, le modèle s'avère incapable d'assurer toute la recharge de février-mars, les variations du niveau sont très amorties (fluctuations d'environ 3 mètres) (fig. VI.21 A).

Par contre, si on laisse les paramètres s'optimiser, on améliore de manière très nette le calage (fig. VI.21 B). Le critère d'ajustement passe de 0,86 à 0,97. La phase de baisse du niveau d'avril à octobre est assez bien simulée ainsi que la petite recharge de juin. Par contre, la remontée de novembre, quoique identifiée par le modèle, reste limitée à une vingtaine de centimètres contre plus d'un mètre en réalité ; la variation possible du coefficient d'emmagasinement avec la profondeur n'est pas prise en compte par le modèle. L'ajustement n'est cependant pas très probant, compte-tenu de la durée d'observation très courte qui ne présente aucune grande remontée, mais uniquement un tarissement interrompu deux fois.

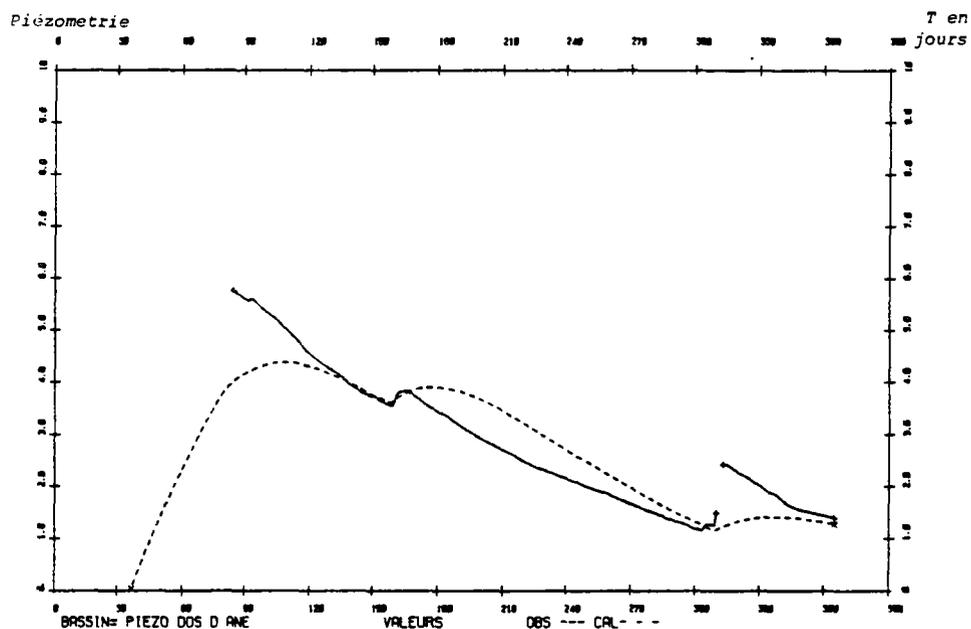
En ce qui concerne les paramètres (figure VI.21), les principales modifications intéressent les temps de tarissement (allongés après optimisation) et le temps de percolation (au contraire diminué).

Ceci se répercute par une augmentation très nette de l'écoulement de base et par conséquent de la réserve souterraine. En revanche, l'écoulement hypodermique diminue considérablement et ce jeu de paramètres ne permet pas une bonne simulation des débits.

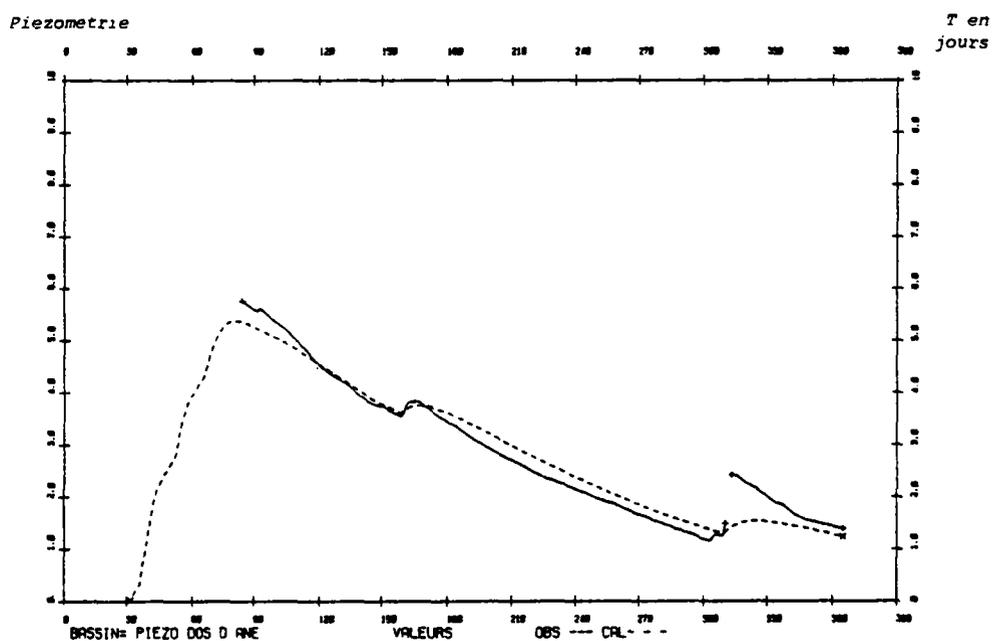
Le coefficient d'emmagasinement équivalent est estimé à $8,7 \cdot 10^{-2}$.

Le suivi sur plusieurs années du piézomètre devrait permettre d'effectuer un calage plus rigoureux et une meilleure identification des paramètres. Mais dès à présent, il apparaît des divergences assez nettes dans l'évolution comparée des débits de la ravine à Marquet et du niveau piézométrique de la nappe testée à Grand Coin. Même si cette nappe participe au soutien de la ravine, elle ne doit, dans le secteur de Grand Coin, qu'y jouer un rôle secondaire. Il est vraisemblable qu'il n'y ait pas continuité entre cette nappe et celle qui affleure au pied du rempart formant une zone marécageuse drainée par la ravine à Marquet, mais aucun élément ne nous permet d'identifier et situer une quelconque limite imperméable (ou semi-imperméable).

La nappe rencontrée au niveau du forage est peut-être en relation avec la source Barrois.



A - Paramètres optimisés sur les débits



. Capacité rés. sup.	mm	148,78	. Seuil aquif. sup.	mm	1499,95
. Seuil de ruiss.	mm	13,17	. Exposant ETP		1,00
. Capacité rés. l	mm	196,37	. Pourc. aquif. semi-perm.		39,93
. Sétention rés. l	mm	15,29	. Coefficient pointes		63,82
. Tariss. aquif. inf.	jour	149,28	. Temps Percol.	jour	7,38
. Tariss. aquif. sup.	jour	90,03	. Coeff. Emm.		$8,7 \cdot 10^{-2}$
. Tariss. hypod.	jour	45,24	. Niveau de base		0,67
. Tariss. super.	jour	3,91	. Critère d'ajustement final		- 0,976 (280 valeurs)
. Retard percol	jour	104,82			

B - Paramètres optimisés sur les niveaux

FIG. VI.21 - Simulation de la piézométrie journalière à Dos d'Ane

Le suivi simultané des débits des différentes sources (Barrois et Galet Rond) et de la ravine à Marquet, pendant de nouveaux essais de pompage de longue durée sur le forage de Grand Coin (sous réserve de stockage des débits d'exhaure), permettrait d'identifier les exutoires de ces nappes et leurs éventuelles relations.

2.6. Conclusion

Après deux années de fonctionnement des différents appareils mis en place sur le bassin versant du Dos d'Ane, nous sommes en mesure d'appréhender les différents termes du bilan hydrologique de ce secteur et de différencier diverses composantes de l'écoulement.

Nous mettons ainsi en évidence la prépondérance d'un écoulement retardé (de quelques jours à deux mois après les fortes précipitations) et surtout une proportion importante de pluie efficace qui échappe au contrôle dans la ravine et alimente les nappes souterraines à l'aval.

D'après la reconstitution des débits sur la période 1967-1982 par application d'un modèle global, on estime la lame d'eau moyenne inter-annuelle qui s'infiltré profondément à près de 700 mm.

Si la poursuite des études, à l'avenir, confirme ces résultats, et tenant compte des réserves d'extrapolation du bassin de Dos d'Ane à l'ensemble des Hauts de l'Ouest, il est indéniable que les réserves souterraines de ce secteur sont potentiellement en mesure d'en satisfaire les besoins en eau.

Il resterait dans ce cas à résoudre tous les problèmes relatifs à la géométrie de ces nappes et au cheminement de l'eau dans le sous-sol de ce secteur de l'île, avant d'envisager une quelconque exploitation de ces ressources.

Il demeure indispensable de continuer à suivre les installations mises en place et nous ne saurions trop encourager toutes les initiatives permettant de mieux cerner encore les différents paramètres hydroclimati-

ques. Il serait notamment intéressant de :

- Préciser les données d'entrée, pluie et évapotranspiration :
 - . bien suivre l'évolution comparée de la hauteur de pluie entre les postes de Dos d'Ane et Grand Coin,
 - . éventuellement implanter un autre pluviomètre au niveau du rempart afin de tester l'existence d'un gradient pluviométrique avec l'altitude,
 - . installer des instruments permettant de mieux connaître l'évaporation ou l'évapotranspiration ; à défaut de bac ou de case lysimétrique, un héliographe permettrait de préciser le facteur insolation,

- Continuer le suivi du débit de la ravine à Marquet, nous disposons d'un dispositif très satisfaisant qui mériterait cependant quelques améliorations :
 - . une meilleure approche des débits de crues et des volumes écoulés correspondants, permettrait de préciser les résultats actuels,
 - . l'isolation, contre l'humidité excessive, de l'appareil enregistreur diminuerait les risques de non-fonctionnement,

- Envisager différentes opérations permettant de préciser l'hydrogéologie de ce secteur [1] :
 - . pompage d'essai en période d'étiage afin de mieux tester les possibilités de la nappe, avec suivi simultané des débits de la ravine à Marquet et des sources Barrois et Galet Rond (débits d'exhaure non rejetés dans la ravine !),
 - . réalisation d'un forage équipé en piézomètre afin de définir un coefficient d'emmagasinement, un forage assez profond, 100 m, donnerait en outre d'intéressantes informations sur la géologie et la géométrie des nappes au niveau de Grand Coin, (extension des formations détritiques, présence de niveaux imperméables et d'aquifères distincts...),
 - . expérience de traçages avec suivi des sources et puits en aval écoulement ; l'injection de fluorescéine de 1981 n'ayant donné aucun résultat, il faudrait envisager l'emploi de quantité plus élevée de dilution différentes ou d'un autre traceur.

Les premières simulations à partir de modèles globaux réalisées à Dos d'Ane nous incitent à poursuivre dans cette voie.

Bien que l'épisode pluvieux soit plutôt d'ordre journalier, le modèle à pas de temps mensuel permet une approche très satisfaisante du fonctionnement hydrologique du bassin. Le contraste saisonnier explique la majorité des variations tant dans la distribution des hauteurs de pluie que des débits. Ces paramètres sont en outre plus facilement identifiables à des paramètres hydrologiques du bassin (temps de tarissement..) que ceux du modèle journalier.

De mise en oeuvre simple, le modèle à pas de temps mensuel est un élément précieux pour le contrôle des données climatiques, et la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins réunionnais. Ils permettent indirectement de quantifier les flux souterrains au niveau des bassins étudiés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BARGEAS A., STEENHOUDT M. (1982) .- Le bassin versant expérimental du Dos d'Ane (Ile de La Réunion) - Mise en place des équipements .- Rapport BRGM 82 REU 22
- [2] BARGEAS A. (1983) .- Le bassin versant expérimental de Dos d'Ane - Exploitation des données recueillies en 1981 et 1982 .- Rapport BRGM 83 REU 19
- [3] B.R.G.M. .- Banque des données du Sous-sol - Recueil de données concernant les eaux souterraines
- [4] MAZENC B. (1981) - Etude des relations entre les caractéristiques physiques et les paramètres d'un modèle hydrologique de bassin versant. Application à La Bretagne. Thèse de Docteur Ingénieur - Université de Montpellier.
- [5] THIERY D. (1980) .- Simulation de bassins hydrologiques par modèles globaux - Programme AMANDE, Description et mode d'emploi .- Rapport B.R.G.M. 80 SGN 192 HYD
- [6] THIERY D. (1983) .- Description du modèle CREACHIM .- E.R.G.M. Orléans, SGN/EAU Note technique n° 83/15, 53 p.

ANNEXES

ANNEXE VI.1

LE MODELE AMANDE*

Il s'agit d'un modèle global à réservoir fonctionnant au pas de temps journalier. Le principe de fonctionnement est de même type que pour le modèle GARDENIA (cf 4me partie), faisant intervenir une fonction de production (bilan) et une fonction de transfert (vidange successive de réservoirs). Le découpage du bassin en une zone perméable et une zone semi-perméable, ainsi que des lois de transfert différentes, compliquent un peu ce schéma.

1. LA FONCTION DE PRODUCTION

- Elle est assurée par différents réservoirs :
 - Le *réservoir superficiel* (U) schématise l'interception des précipitations par les premiers centimètres du sol recouvert de la végétation. Alimenté par les précipitations, ce réservoir est vidangé par :
 - l'évapotranspiration lorsque les pluies sont insuffisantes : P ETP,
 - le débordement (DEBO) qui se répartit en deux composantes :
 - . en eau de surface ; si DEBO est supérieur au seuil de ruissellement SR
- $$ESU = CR \cdot \frac{(H - SR)}{H + SR} \frac{1 - e^{-\alpha}}{1 - e^{-1}}$$
- avec ESU quantité d'eau disponible pour le ruissellement
 CR coefficient de ruissellement de l'écoulement superficiel
 SR seuil de ruissellement
 H hauteur d'eau disponible après évapotranspiration
 α saturation du réservoir intermédiaire
- . en alimentation des réservoirs intermédiaires (ALIM)

* d'après D. THIERY .- Simulation de bassins hydrologiques par modèles globaux - Programme AMANDE .- Rapport BRGM 80 SGN 192 HYD

- Le *réservoir intermédiaire L*, dans la zone perméable, est alimenté par toute la quantité d'eau ALIM qui déborde du réservoir U et qui n'a pas ruisselé en surface. Il est vidangé par :

- l'évapotranspiration

Suivant la même loi que dans la zone semi-perméable :

$$ECOM = ET \times (LP/LST)^{EX}$$

avec ECOM évapotranspiration complémentaire

ET évapotranspiration non satisfaite par les précipitations et le réservoir U

LH niveau dans le réservoir L (zone semi-perméable),

LST niveau maximal du réservoir L

EX exposant 1 à 2 (paramètre)

. de l'ordre de 1 pour les terrains argileux

. de l'ordre de 2 pour les terrains plus perméables

- le débordement :

Si l'alimentation ALIM élève le niveau L au-dessus du niveau maximal LST, la quantité excédentaire devient de l'eau hypodermique.

- la percolation vers l'aquifère :

Si le niveau du réservoir L est supérieur à la capacité de rétention du sol LFC (Field Capacity en anglais), une partie GW (Ground Water) de l'excédent s'infiltré à la nappe :

$$GW = \underbrace{\frac{1}{TP}}_{\text{temps de percolation}} \times \underbrace{(LP - LFC)}_{\text{charge}} \times \underbrace{\frac{LP - LFC}{LST - LFC}}_{\text{état de saturation du sol (perméabilité verticale)}} \times \underbrace{e^{-2(RP-NJ)}}_{\text{retard}}$$

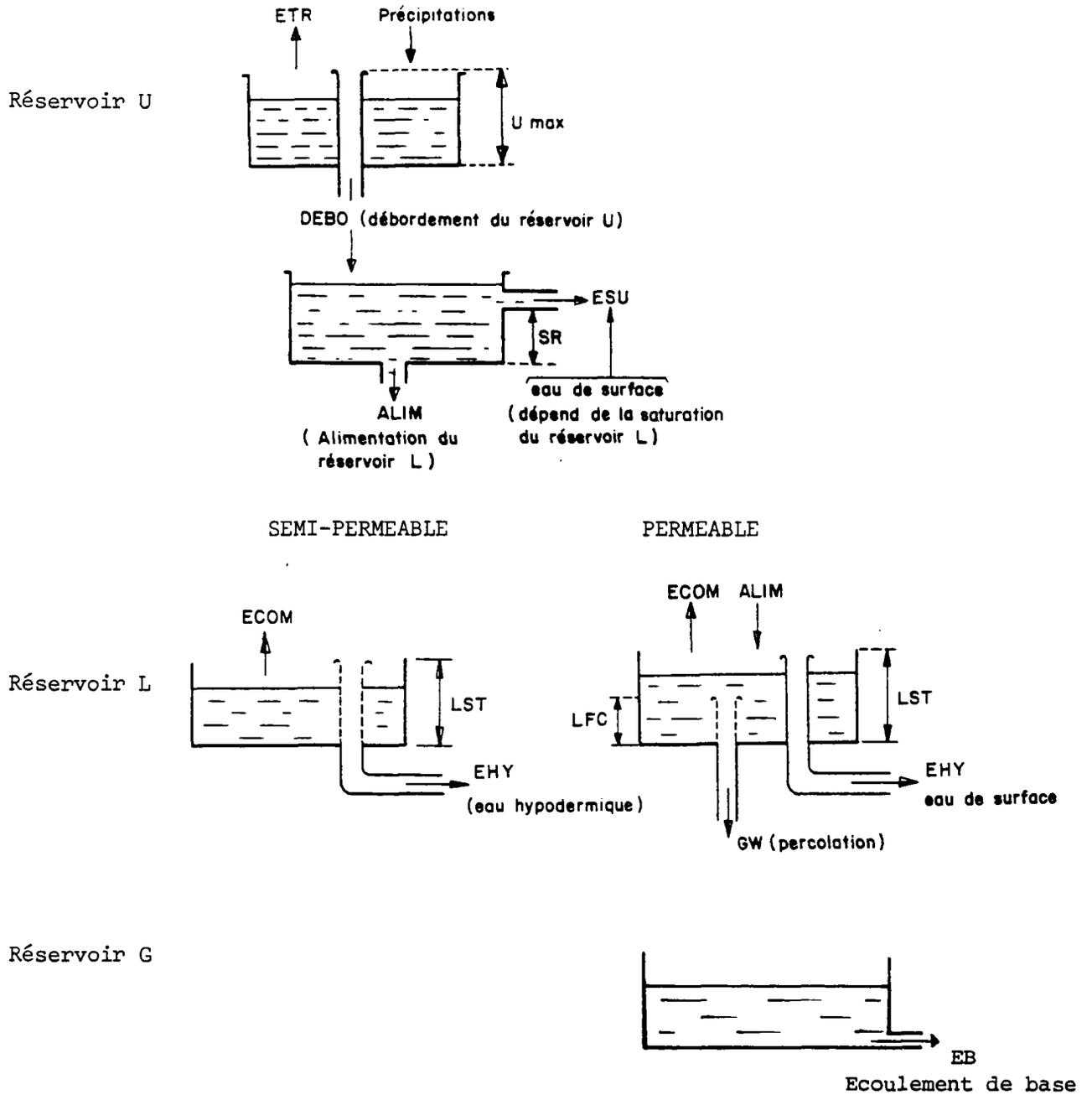
avec TP constante de temps de percolation exponentielle (paramètre)

LFC capacité de rétention du sol

LP niveau dans le réservoir L (zone perméable)

RP retard de percolation (paramètre)

NJ nombre de jours consécutifs depuis que la capacité de rétention est atteinte (pour tenir compte du temps nécessaire à mouiller la zone non saturée)



Dans la zone semi-perméable, une partie de ALIM devient directement de l'eau hypodermique :

$$EHY = ALIM \times LH/LST$$

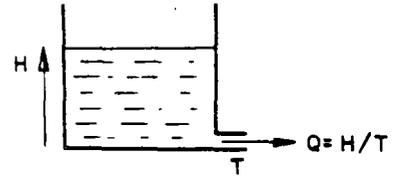
et l'autre partie ALIM alimente le réservoir L.

Il n'y a que deux composantes de vidange :

- l'évapotranspiration complémentaire quand le réservoir U est sec,
- débordement en eau hypodermique au delà de la capacité LST.

2. LA FONCTION DE TRANSFERT

Le transfert de chaque composante est assuré par un réservoir linéaire. Chaque réservoir est caractérisé par une capacité illimitée et une constante de temps T . Le débit Q est proportionnel à la charge au-dessus du niveau de vidange.



$Q = H/T$, ce qui produit, si T est nettement plus grand qu'un pas de temps (1 jour), un tarissement exponentiel du type :

$$Q = Q_0 e^{-t/T_e}$$

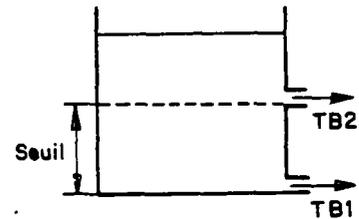
avec $T_e \rightarrow T$

Par exemple, pour l'écoulement souterrain, en utilisation normale, la loi de vidange est :

$$EB = PI / TB1$$

avec EB écoulement de base
 PI niveau piézométrique
 TB1 constante de tarissement de l'écoulement de base

Dans certains cas cependant, on observe un ralentissement du tarissement en-dessous d'un certain niveau ; on a donc laissé la possibilité de simuler une vidange avec 2 constantes de temps correspondant à une variation de la perméabilité suivant la verticale :



- si le niveau est inférieur au seuil :

$$EB = PI / TB1$$

- si le niveau est supérieur au seuil, une partie du débit s'écoule aussi par la couche supérieure :

$$EB = PI/TB1 + (PI - SEUIL) / TB2$$

LISTE DES VARIABLES

ALIM	Eau alimentant les réservoirs L
ALM	Eau alimentant le réservoir L en zone semi-perméable
* CR	Coefficient de Ruissellement
DEBO	Eau débordant du réservoir U
EB	Écoulement de base
EHY	Écoulement hypodermique
ESU	Écoulement superficiel
ET	Évapotranspiration
ETR	Évapotranspiration réelle
* EX	Exposant de la loi d'évapotranspiration
GW	Eau souterraine
L	Réservoir intermédiaire
* LFC	Capacité de rétention du sol
LH	Niveau du réservoir L en zone semi-perméable
LP	Niveau du réservoir L en zone perméable
* LST	Capacité des réservoirs L
NJ	nombre de jours consécutifs à réserve L saturée
PI1	Niveau de l'eau dans le réservoir souterrain
* RP	Retard de percolation
RUI	Débit de ruissellement
* SEUIL	Seuil de réparation des aquifères
* SHY	Superficie de la zone semi-perméable en % de la superficie totale
* SR	Seuil de ruissellement
SU	Niveau de réservoir superficiel
SURF	Surface totale du bassin versant
* TB1	Constante de temps de tarissement de l'écoulement de base
* TB2	Constante de temps de tarissement de l'écoulement de base au-dessus du seuil
* THY	Constante de temps du débit hypodermique
* TP	Constante de temps de percolation
* TSU	Constante de temps de ruissellement
U	Réservoir superficiel
* UST	Capacité du réservoir U

* Paramètre du modèle

ANNEXE VI.2

EXTENSION DANS LE TEMPS DE LA CHRONIQUE DES LAMES D'EAU MENSUELLES SUR LE BASSIN DE LA RAVINE A MARQUET, A PARTIR DES RELATIONS ETABLIES ENTRE LES PRECIPITATIONS MENSUELLES A DOS D'ANE ET A GRAND COIN

De décembre 1980 à février 1983, nous disposons de 27 valeurs communes de pluie mensuelles aux postes de Dos d'Ane et Grand Coin.

La représentation des couples de valeurs correspondant à cette période (fig. 1) permet de tenter une régression linéaire. Afin de limiter l'importance des fortes valeurs, nous avons également établi une relation à partir des racines carrées de ces valeurs mensuelles. En fait, dans la tranche de 0 à 400 m, les courbes représentatives des relations établies sont assez proches l'une de l'autre (fig. 1). Les coefficients de corrélation sont élevés (0.97) dans les deux cas. Il apparait ainsi un rapport de 1.5 entre les hauteurs de précipitations mensuelles à ces deux postes qui semble très élevé pour ces stations distantes de 2 km, mais à l'aval l'une de l'autre, la différence d'altitude atteignant tout juste 150 m.

D'après notre expérience du site, relevé hebdomadaire des enregistrements depuis deux ans, les nuages, le plus souvent vers la mi-journée, remontent fréquemment la ravine à Marquet pour venir s'amonceler au niveau de la cuvette de Grand Coin, en commençant par le hauts des remparts. Il n'est pas rare alors qu'il pleuve à Grand Coin sans pleuvoir à Dos d'Ane (augmentation de l'humidité, détente et refroidissement sont sans doute à l'origine de ce phénomène). Il ne s'agit là que d'observations qualitatives et les pluies observées n'ont jamais été très violentes. Mais pourquoi n'en serait-il pas de même lors des épisodes pluvieux importants. En février 1982, respectivement le 6 et le 23, le poste de Grand Coin a enregistré 284 et 251 mm, celui de Dos d'Ane n'a comptabilisé que 173 et 138 mm (jour considéré de 7 h le jour j, à 7 h le jour j+1 dans les deux cas).

A Dos d'Ane, comme sur l'ensemble de l'île, une très forte proportion des pluies (80 %) tombe pendant la période cyclonique de décembre à avril ; à l'opposé, les mois de juillet à octobre sont habituellement des mois secs ($P < 20$ mm).

Les précipitations liées aux dépressions cycloniques sont brèves et violentes ; les 2344 mm de janvier 1980 sont dûs au cyclone Hyacinthe. En 12 jours, la hauteur de pluie est supérieure aux totaux annuels jusqu'alors mesurés.

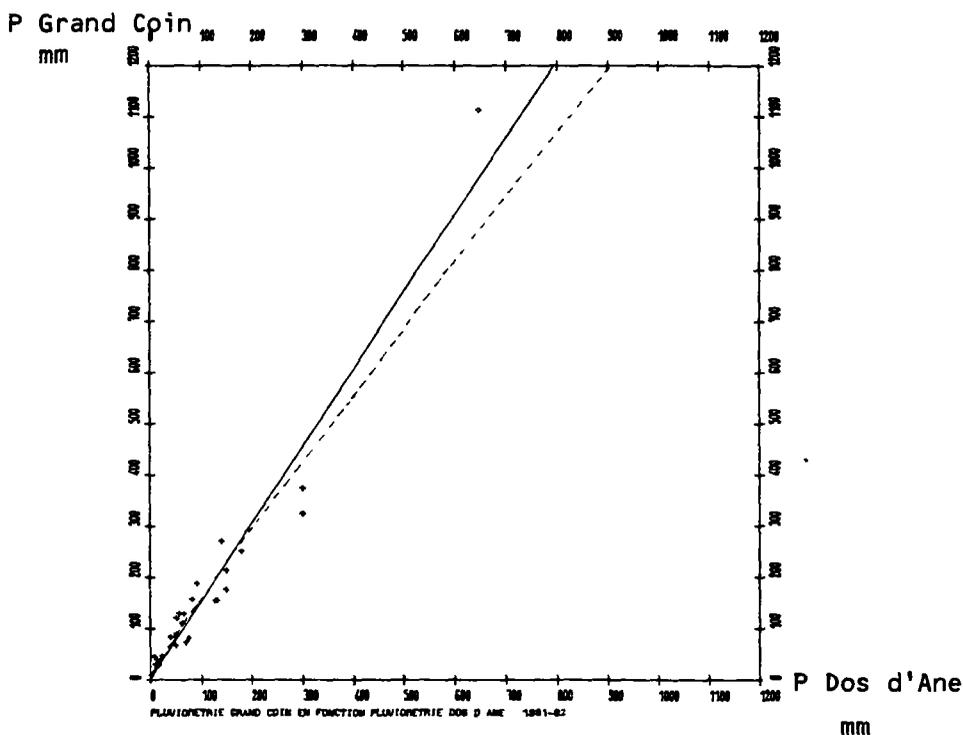
TABLEAU 1 - HAUTEUR DE PLUIE MENSUELLE A DOS D'ANNE - Période 1967-1980
Totaux mensuels et annuels de pluie en mm

* ANNEE *	* JAN *	* FEV *	* MAR *	* AVR *	* MAI *	* JUN *	* JUI *	* AOU *	* SEP *	* OCT *	* NOV *	* DEC *	* TOTAL AN *	
* 1966 *	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	69.0	223.6	*****
* 1967 *	71.1	56.5	187.3	126.5	27.3	10.7	15.2	6.4	3.0	3.7	184.1	42.9	734.7	
* 1968 *	118.3	493.1	404.9	139.3	7.5	18.0	9.0	6.5	0.0	1.0	51.7	50.6	1299.9	
* 1969 *	61.8	289.0	200.9	173.2	140.7	67.8	32.5	36.5	122.5	1.8	12.8	416.4	1555.9	
* 1970 *	913.9	311.9	211.0	10.3	0.0	28.7	0.0	24.9	4.7	3.1	12.6	52.2	1573.3	
* 1971 *	573.2	229.6	54.1	138.7	98.5	7.4	6.8	0.0	2.7	56.7	255.2	121.5	1544.4	
* 1972 *	165.7	474.2	233.3	100.2	70.8	81.5	40.9	136.7	26.3	19.0	82.8	121.9	1553.3	
* 1973 *	715.8	158.2	656.9	36.0	56.2	*****	20.5	47.4	15.3	44.1	0.0	197.2	*****	
* 1974 *	331.0	317.6	242.7	219.3	111.5	82.8	10.3	8.3	4.8	41.5	53.3	258.6	1681.7	
* 1975 *	143.3	297.4	221.4	83.9	37.0	15.9	50.1	13.7	2.9	0.0	79.9	96.9	1042.4	
* 1976 *	138.5	130.9	125.7	156.6	98.8	32.5	8.1	36.3	44.5	18.7	1.2	119.0	910.8	
* 1977 *	510.7	795.5	91.0	139.8	125.9	0.0	130.8	0.0	0.0	12.3	9.3	184.0	1999.3	
* 1978 *	125.9	177.7	141.1	516.3	15.2	36.9	64.4	6.2	6.7	12.9	146.8	58.1	1308.2	
* 1979 *	109.6	518.1	94.4	231.8	24.8	35.0	16.1	63.3	2.4	35.4	122.4	270.0	1523.3	
* 1980 *	2344.0	105.8	273.7	223.0	51.8	18.5	3.7	0.0	32.9	35.0	11.5	75.0	3174.9	

MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES DE PLUIE EN M/M
(DE 1966 A 1980)

* MOYENNES *	451.6	311.1	224.2	163.9	61.9	33.5	29.2	27.6	19.2	20.4	72.8	152.5	1567.9
--------------	-------	-------	-------	-------	------	------	------	------	------	------	------	-------	--------

Régressions linéaires entre les pluviométries mensuelles à DOS D'ANE et à GRAND COIN - Période de Déc.1980 à fév.1983



Y: GRAND COIN PLUVIOMETRIE MENSUELLE EN MM 1980-83

-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	82.0
324.5	111.5	374.5	213.5	30.0	84.0	68.0	9.5	29.0	40.0	74.5	176.0		
251.0	1113.0	273.0	129.5	90.0	130.5	35.0	46.5	46.0	155.0	155.5	121.0		
188.5	157.5	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0

X: DOS D'ANE PLUVIOMETRIE MENSUELLE EN MM 1980-83

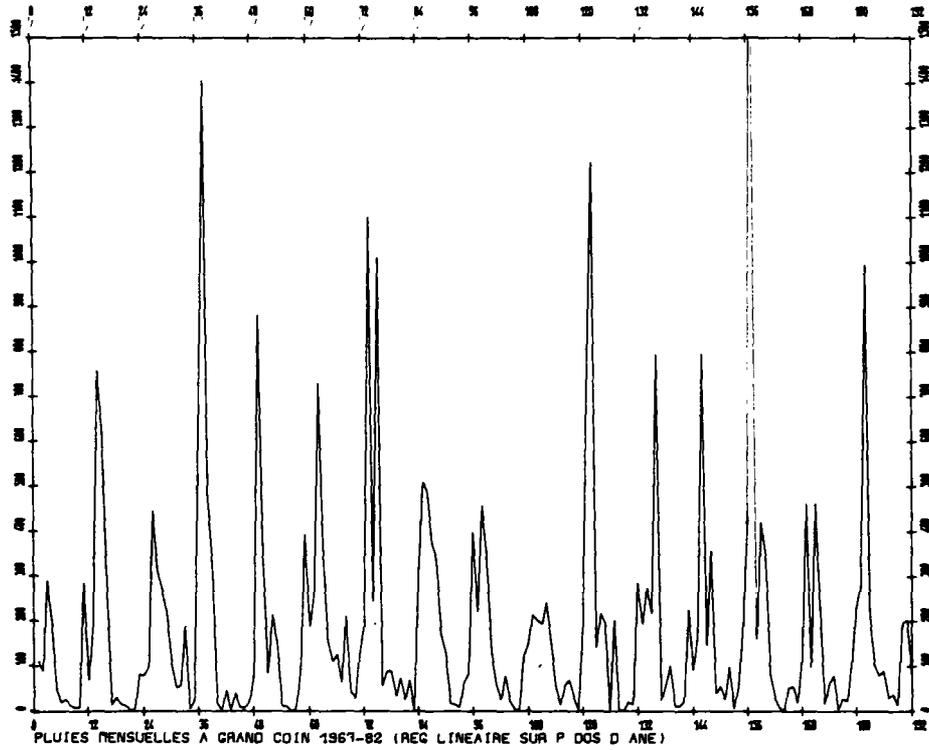
-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	75.0
300.0	62.5	300.0	150.0	10.0	40.0	50.0	1.5	17.0	13.5	70.0	150.0		
181.0	647.5	140.0	66.0	51.0	57.5	18.5	23.5	8.5	127.5	131.5	51.5		
91.0	51.5	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0

REGRESSION LINEAIRE Y=F(X) (———)
 27 VALEURS RETENUES
 YM= 108.0 SX= 131.0
 YM= 156.9 SY= 206.8
 R= 0.9721 A= 1.5352 B= 1.6993
 SE= 0.2347 SA= 0.0713 SB= 9.3435 SYP= 48.5503

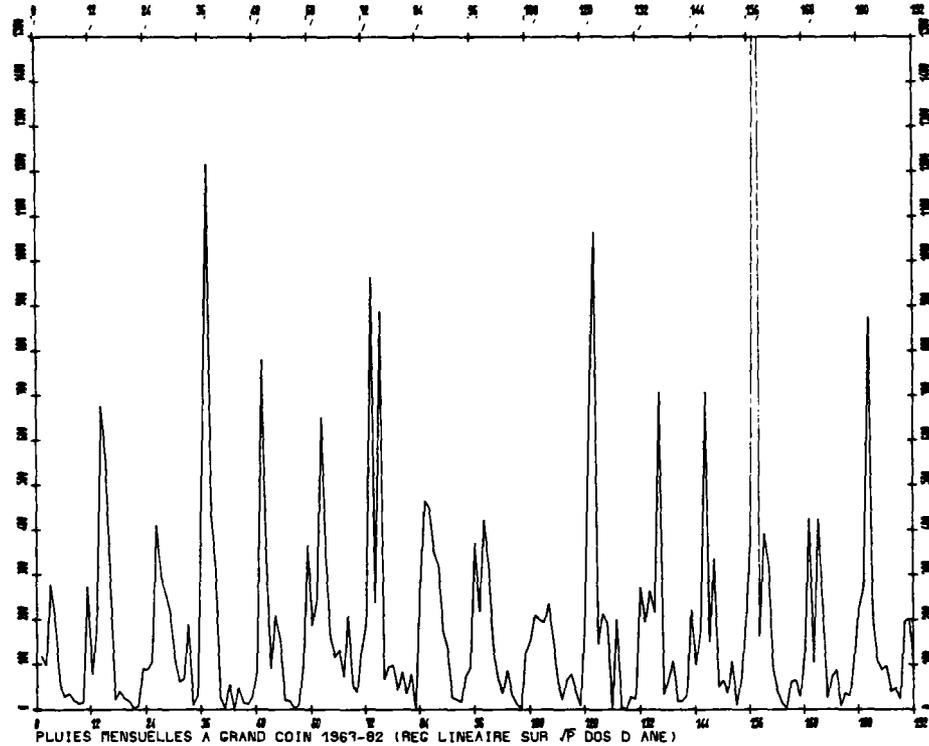
REGRESSION LINEAIRE (Y=F(X)) (- - - -)
 27 VALEURS RETENUES
 XM= 9.0 SX= 5.1
 YM= 11.5 SY= 5.9
 R= 0.9007 A= 1.1019 B= 1.5624
 SP= 0.2350 SA= 0.0559 SB= 0.2877 SYP= 1.4951

En appliquant les relations établies, nous obtenons ainsi deux échantillons de pluie à Grand Coin ; la poursuite des mesures communes en ces deux stations nous permettra de vérifier la qualité de ces reconstitutions.

Hauteurs de pluies mensuelles calculées à GRAND COIN, d'après les relations établies avec le poste de DOS D'ANE



P2



P3

ANNEXE VI.3

ETUDE DES QUELQUES CRUES DE LA RAVINE A MARQUET

- Temps de réponse du bassin

Le déphasage entre les pointes correspondantes de la pluie et du débit se situe dans la majorité des cas dans l'intervalle de 1 h à 1 h 30. (L'annotation de l'heure réelle sur les enregistrements lors de nos visites permet de vérifier un déroulement correct du papier ou de détecter un décalage).

Dans le cas de saturation du sol ou d'épisodes très intenses (voire de précipitation intéressant d'abord l'amont du bassin), le temps de réponse diminue, il serait inférieur à la demi-heure le 10 mars 1982. De même le temps de montée est d'autant plus bref que l'intensité de la pluie est élevée. (Dans le cas d'averses brèves et intenses, temps de réponse et temps de montée sont pratiquement équivalents), il est de l'ordre de 40 minutes le 10 mars 1982 et le 6 novembre 1982. Dans le cas d'averses plus longues et irrégulières, il peut dépasser 2 heures (13 décembre 1982).

- Etude de quelques exemples

Nous avons étudié quatre épisodes de crues qui représentent la majorité des exemples relevés pendant ces deux années : deux épisodes de saison des pluies, un important et long correspondant à deux jours de fortes précipitations (23-24 février 1982), un très bref et très violent correspondant à une très forte intensité pluviométrique (10 mars 1982) et deux épisodes de saison sèche correspondant à des hauteurs de pluies à peu près équivalentes (100 mm) mais d'intensité plus élevée le 6 novembre 1982 que les 8 et 9 juin 1982.

- Crue du 23-24 mars 1982

La hauteur de pluie correspondante représente le maximum relevé sur 24 h, 36 h et 48 h consécutives à Grand Coin (voir paragraphe 2.1.3.2.) avec respectivement 288,5, 365 et 429,5 mm. Cet épisode intervient de plus à la suite d'un début de mois également très pluvieux, environ 600 mm qui assuraient des conditions de saturation du sol proches de l'optimum et favoriseraient le ruissellement.

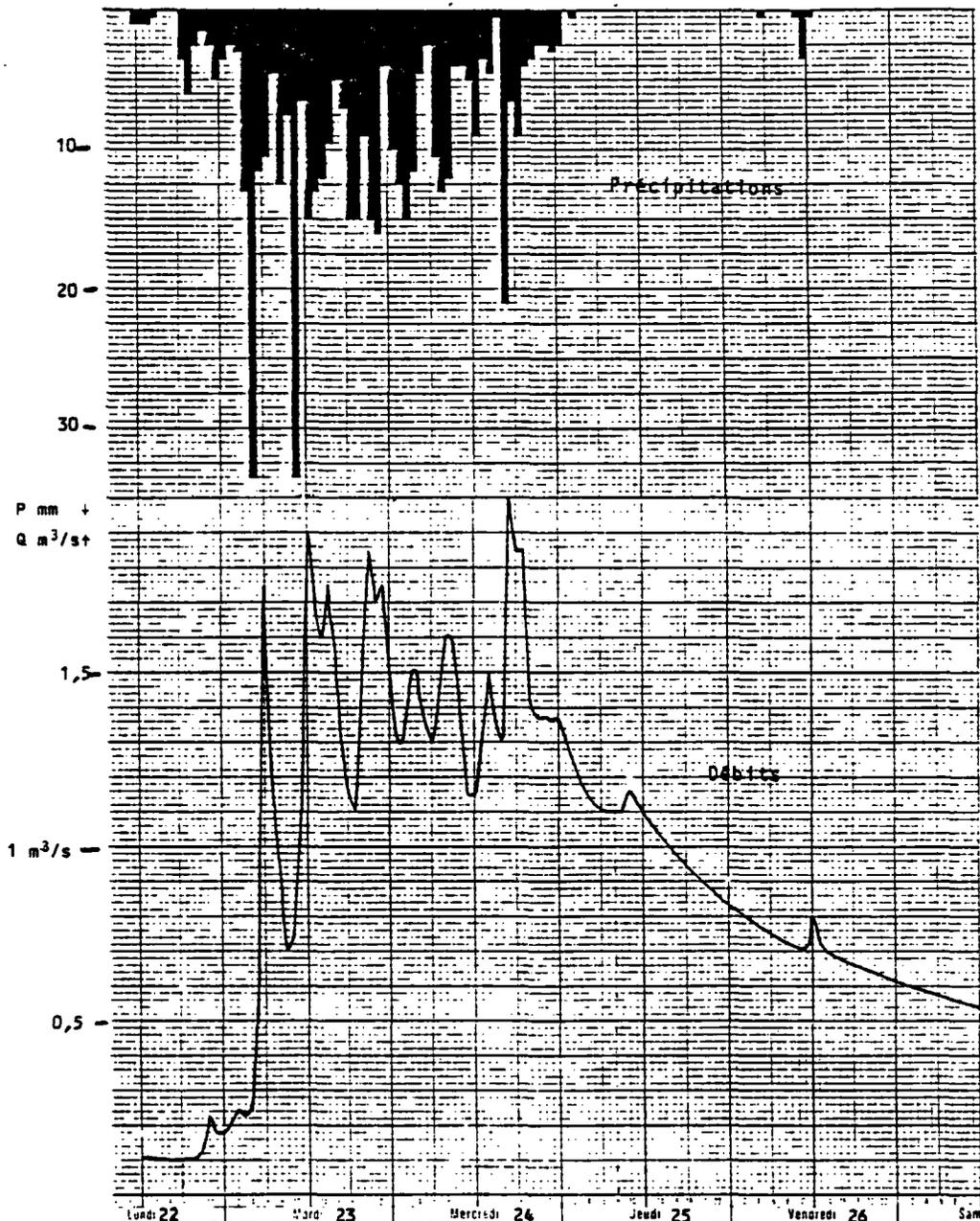
Ainsi, pendant deux jours, le débit a oscillé entre 1 et 2 m³/s des valeurs instantanées de l'ordre de 2,7 m³/s ont été enregistrées le 23.

Les 450 mm de pluies tombés du 22 mars (18 h) au 25 février (01 h) représentent un volume de l'ordre de $1,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Par planimétrage de la courbe des débits (fig) on estime à environ :

- $2,6 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ le volume écoulé du 22 (20 h) au 25 (8 h), soit environ 25 % du volume de la pluie, qui représente essentiellement le ruissellement de surface
- $2,8 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ le volume écoulé du 25 (8 h) au 3 mars (18 h) soit environ 26 % du volume de la pluie.

Jusqu'au 3 mars, la courbe de décrue suit une loi exponentielle :

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \alpha = \frac{1}{7 \text{ j}} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$



Après la décrue est influencée et masquée par les pluies de début mars.

On considère que pendant la semaine qui suit l'épisode pluvieux, intervient essentiellement le ruissellement pur (terminé quelques heures après la pluie) et un écoulement retardé (rétention et vidange de la zone non saturée) qui correspond à la courbe de décrue identifiée. La pluie efficace est par ailleurs du même ordre que la pluie (l'évapotranspiration est pratiquement négligeable devant la pluie). Ainsi près de 50 % de cette pluie efficace alimentent les réserves souterraines. Nous ne cherchons pas à déterminer pour l'instant ce qui participe au soutien de la ravine à l'étiage ou au contraire ce qui échappe au contrôle.

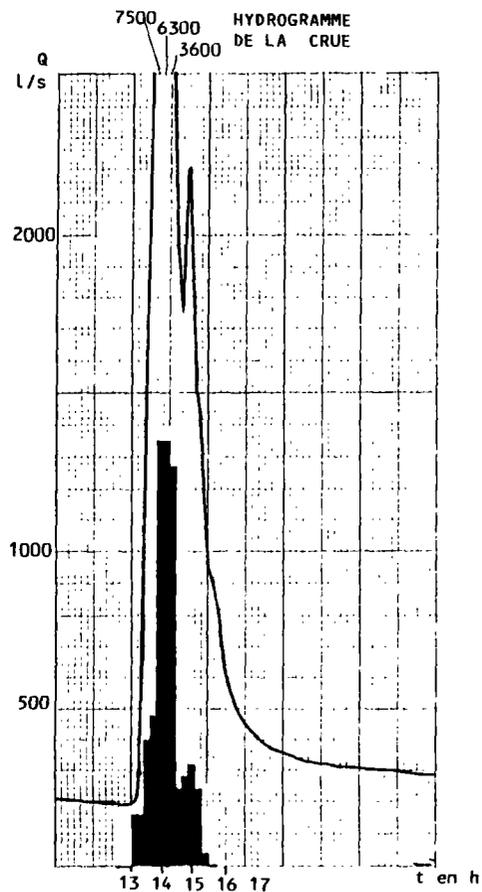
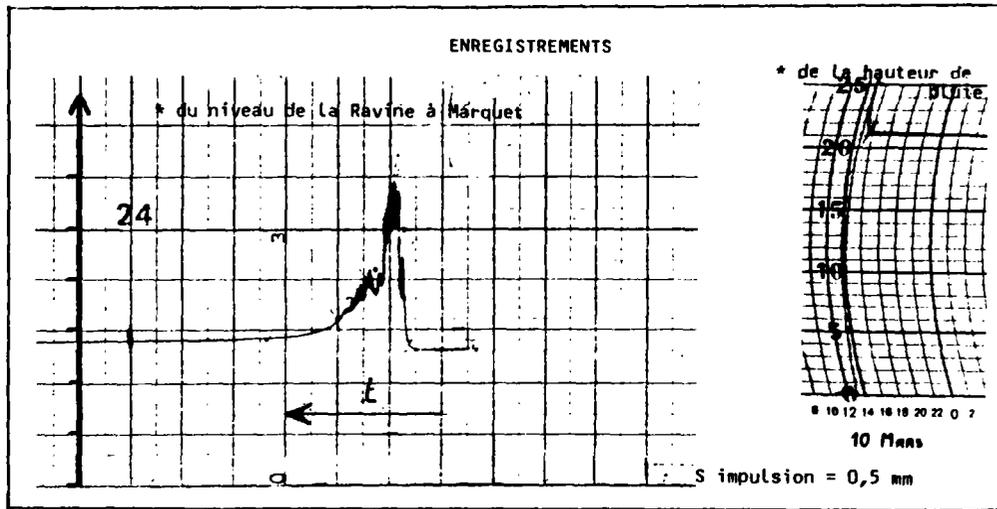
- Crue du 10 mars 1982

Cet épisode pluvieux du 10 mars correspond à l'intensité maximale de pluie relevée à Grand Coin sur 30', 1 h et 2 h. Il intervient également, après les fortes pluies de février, à un moment où l'état du sol est proche de la saturation (près de 100 mm de pluie les 3 jours précédents).

La crue est extrêmement rapide et violente, en 40 minutes le débit passe de 194 l/s à environ 10 m³/s (débit estimé) ; pendant deux heures, il reste supérieur au m³/s. Quatre heures après le début de la crue il est redescendu en-dessous de 400 l/s.

D'après l'intégration de la courbe de débits réalisés avec un pas de temps de 12 minutes, le volume écoulé pendant 4 h représente à peine 14 % de la pluie efficace. Sur la journée du 10, on note une augmentation moyenne de débit de 400 l/s, le volume équivalent sur la journée représente 34,5 10³ m³ (moins de 20 % de la pluie efficace). Il devient délicat au-delà de la journée d'estimer l'écoulement dû à ce seul épisode pluvieux parce que la décrue est influencée à partir du 15 mars par un nouveau petit épisode pluvieux.

Cet épisode de pluie très intense et très bref a entraîné le débit spécifique de crue maximal enregistré à la station 4 m³/s/km². Mais la crue très violente fut également très fugace et le volume dû au seul ruissellement de surface représente à peine 15 % de la pluie efficace. Une très importante proportion de cette pluie efficace transite par le sous-sol du bassin.

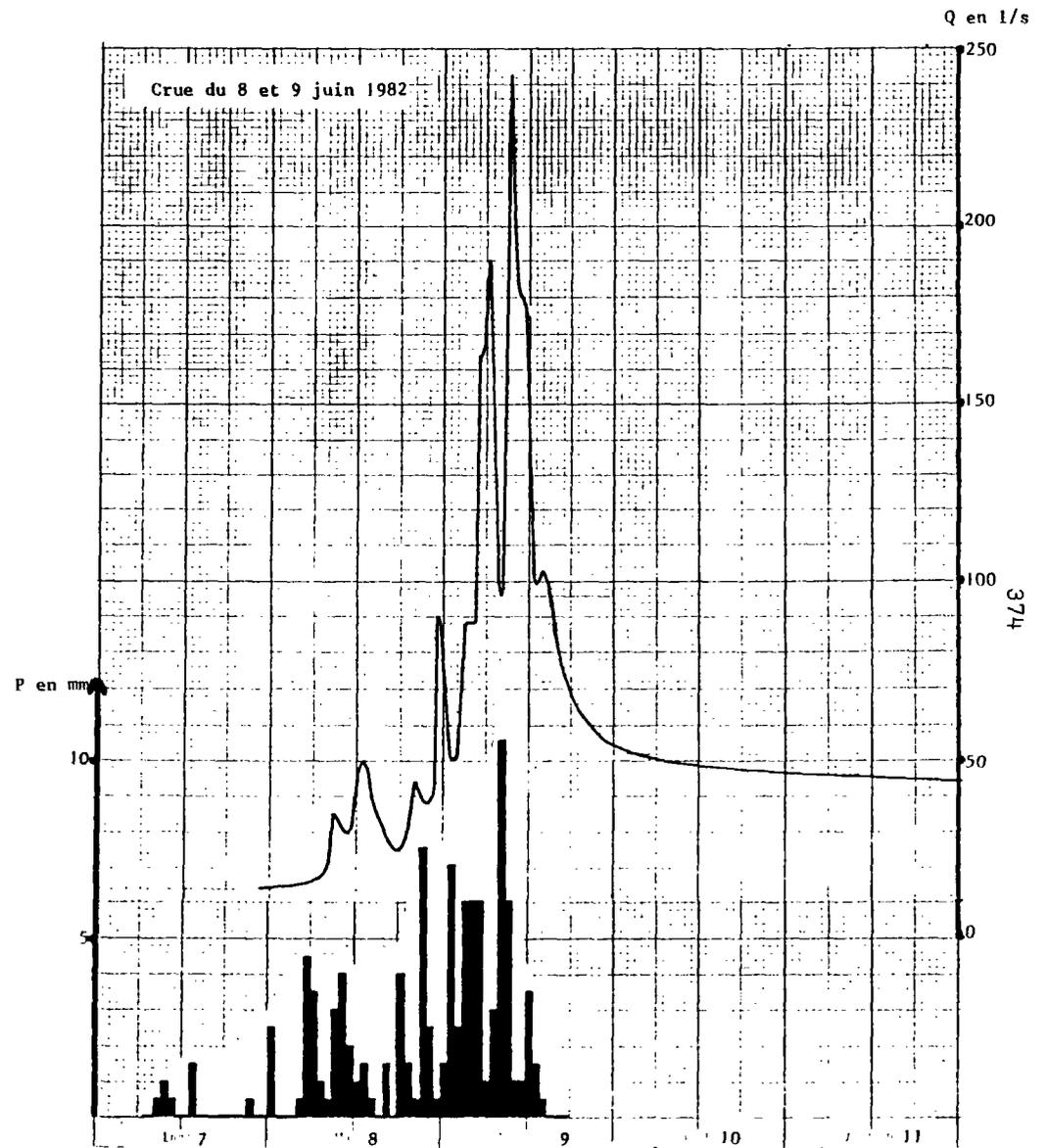


Crue du 10 mars

La restitution sur un pas de temps de 12' du débit de la Ravine à Marquet, ainsi que de la hauteur de pluie correspondante aux pertes de Grand Coin à partir des enregistrements ci-dessus, est soumise à diverses imprécisions :

- décalage entre l'heure réelle et celle pointée par l'enregistreur,
- épaisseur du trait et variation rapides de niveau dans la ravine,
- mauvaise connaissance de la courbe de tarage pour les forts débits (débit instantané de crue estimé à plus de $10 \text{ m}^3/\text{s}$).

On remarque que dans ce cas de pluie, de fortes intensités, la réponse de la rivière est quasi-immédiate (30 minutes), la crue très violente est également très brève et la proportion de pluie qui s'écoule dans la journée est assez faible (inférieure à 20 %).



Le temps de réponse diminue au cours de l'averse. Une faible proportion (5 %) de la pluie s'écoule pendant les deux jours des 8 et 9 juin.

- Crue du 8-9 juin 1982

Nous sommes au début de la saison sèche, le débit de la ravine est retombé en-dessous de 20 l/s, il n'y a pas eu de pluies importantes depuis deux mois. Ainsi sur les 100 mm de pluie tombés les 8 et 9 juin, une proportion d'à peine 5 % s'écoule dans la ravine pendant ces deux jours, le ruissellement pur représentant moins de 3 %. La courbe de décrue visible du 10 au 21 juin a pour exposant $\alpha = \frac{1}{32} j - 1 = 8,7 \cdot 10^{-6} s^{-1}$; la réserve correspondante à cette décrue représente le 9 à 24 h : $6,22 \cdot 10^3 m^3$ (moins de 3 % de la pluie).

Cet épisode pluvieux a été irrégulier (intensité très variable d'une heure à l'autre mais jamais très forte). La crue correspondante est complexe avec plusieurs pics très brefs, mais l'essentiel de la pluie a été absorbé par le sol et le sous-sol.

- Crue du 6 novembre 1982

L'épisode pluvieux du 6.11.82 est relativement intense (100 mm en 3 h), il intervient en fin de saison sèche, mais la semaine précédente les fortes précipitations du 31 octobre ont contribué à ressaturer le sol. La crue est violente. Le débit passe de moins de 10 l/s à environ 2 m³/s en 40 minutes. Pendant plus de 3 h, il reste supérieur à 500 l/s. Cependant le volume ruisselé ne constitue, une fois encore, qu'un très faible pourcentage du volume d'eau tombée : le volume écoulé pendant la pluie ne représente pas 4 % de la pluie, pendant la journée du 6 : 6 %, pendant la semaine suivant cette pluie : à peine 17 %.

°°°

Si les crues de la ravine à Marquet peuvent être très violentes (débit instantané atteignant 10 m³/s) elles sont aussi très fugaces et le volume d'eau correspondant au ruissellement superficiel ne représente qu'une faible proportion du volume de pluie efficace ; même dans des conditions pratiquement optimales de saturation du sol ou lors de pluies très intenses, ce rapport n'atteint pas 25 %. En période plus sèche, il peut par contre descendre en-dessous des 5 %.

Les conditions de saturation du sol avant l'épisode pluvieux considéré jouant un rôle primordial dans la répartition de la pluie efficace, entre ruissellement superficiel et transit de l'eau par le sous-sol. L'intensité de la pluie (à un pas temps inférieur à l'heure) conditionne essentiellement le débit maximal instanné et la forme de l'hydrogramme, mais n'agit pratiquement pas sur la proportion d'eau ruisselant à la surface du sol.

Les débits évoluent très rapidement au cours d'une crue et une étude précise nécessiterait un pas de temps de quelques minutes.

CONCLUSIONS GENERALES

Dans le contexte hydroclimatique extrêmement contrasté de l'île de La Réunion, effectuer des bilans d'eau à l'échelle annuelle, voire interannuelle, n'aurait guère de signification.

Les modèles globaux de simulation hydrologique que nous avons employés nous offrent la possibilité de confronter les différents termes du bilan d'eau à des pas de temps compatibles avec les temps de réponses des systèmes hydrologiques considérés ; les études réalisées en sont d'autant plus significatives.

Mais ces modèles de simulation, comme toute étude des bilans d'eau dans un système hydrologique, demandent une évaluation préalable aussi rigoureuse que possible des données d'entrée (hauteurs de pluie et reprise par évapotranspiration).

CADRE DE L'ETUDE

Dans l'optique de ne pas se limiter aux seuls bassins versants jaugés, mais de réaliser une approche globale des précipitations efficaces sur l'ensemble de l'île, il nous a paru plus intéressant de réaliser un maillage assurant une couverture homogène de l'île et de calculer les différentes valeurs des facteurs climatiques en chacune de ces mailles. De dimension relativement réduite (3 km de côté), ces mailles permettent de rendre compte de la variabilité spatiale des différentes données ; considérées comme surfaces élémentaires de référence, elles peuvent être regroupées pour décrire aussi bien un bassin versant, qu'une unité géographique ou administrative quelconque (tranche d'altitude, communes,...).

PLUIES

L'analyse en composantes principales (ACP) s'est révélée être un guide précieux pour décrire et expliquer l'extrême variabilité des pluies à La Réunion que l'exposition aux vents dominants et l'altitude ne suffisent à résumer : nous avons constaté que, comme dans la plupart des ré-

gions montagneuses de la zone intertropicale, les maximums pluviométriques ne correspondent pas aux crêtes topographiques, mais sont situés à mi-pente des zones exposées au vent dominant.

Afin d'éliminer l'effet d'abondance lié à l'opposition saisonnière dans la répartition des pluies où les quelques mois de décembre à avril correspondant à la période cyclonique (appelée saison des pluies) recueillent une très forte majorité des précipitations annuelles, l'ACP est effectuée sur les hauteurs de pluies profilées. Les hauteurs de pluies mensuelles à chaque station sont ramenées à un indice d'abondance relative par rapport à la pluie moyenne de ce mois à toutes les stations. Cette opération préalable s'est avérée très fructueuse ; elle permet de bien montrer les différences essentielles dans la répartition des pluies entre les cinq secteurs individualisés par l'ACP, différences qui, sur les données traditionnelles de pluies, sont masquées par l'effet d'abondance.

Les résultats de l'ACP ont également servi de support à l'extension de ces données pluviométriques dans l'espace : la répartition régulière des coefficients de corrélation vis-à-vis des composantes nous a incité à affecter une valeur des coefficients en chacune des mailles et à utiliser les relations réciproques de l'ACP.

Le calcul des 132 valeurs mensuelles n'a ainsi nécessité que 5 interpolations (limitant ainsi le biais systématique dû à ces opérations). L'application de cette méthode à diverses stations témoins a montré que seul l'épisode pluvieux simultanément exceptionnel vis-à-vis du mois et de la station considérée était mal reconstitué, ceci pouvant d'ailleurs être un avantage lorsque ce caractère exceptionnel est dû à une erreur de saisie de l'information.

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

Confrontant les différentes méthodes d'approches de l'évapotranspiration aux diverses mesures effectuées à La Réunion, nous avons choisi de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) par la formule mensuelle de Turc, basée sur les données climatiques de température et d'insolation (et d'humidité relative) qui, outre les hauteurs de pluie, sont les seuls facteurs climatiques décrits par un réseau de mesures satisfaisant.

Les données de température ont été étendues à l'ensemble de l'île par application des relations linéaires établies mensuellement entre ce facteur et l'altitude. Seules, les régions d'altitude élevée présentent une incertitude de quelques degrés.

Pour l'insolation, le manque manifeste de relation avec l'altitude ou les autres facteurs climatiques nous a incité à utiliser, comme pour les pluies, les résultats d'une ACP. Bien que contrôlant la fiabilité des estimations ainsi réalisées au niveau des stations, nous n'avons pu lever les incertitudes dans les zones non équipées en héliographes.

Mais ces incertitudes n'ont en fait peu d'influence sur la valeur de l'ETP dont la répartition tant dans l'espace que dans le temps, témoigne du rôle prépondérant joué par la température. En outre, les différentes imprécisions sur les facteurs climatiques entraînent sur l'ETP des incertitudes du même ordre que la sous-estimation habituellement considérée pour la formule de Turc (10 à 20 % de l'ETP mesurée).

L'étude des divers indices d'évaporation (mesure au bac, évaporomètre Piche) indique, par ailleurs, une diminution manifeste de ces valeurs avec l'altitude, beaucoup plus prononcée que pour l'ETP_{Turc}, dont l'éventuelle sous-estimation de l'ETP mesurée, ne serait vraiment effective que dans les zones littorales.

PLUIES EFFICACES SUR L'ENSEMBLE DE L'ILE

Nous avons ensuite réalisé, en chaque maille de l'île, un bilan d'eau mensuel au niveau du sol, faisant intervenir les hauteurs de pluie et d'ETP précédemment calculées, ainsi que la capacité de rétention en eau du sol.

Dans un premier temps, nous avons fixé cette valeur à 100 mm, uniformément sur toute l'île afin d'étudier la répartition spatio-temporelle des pluies efficaces. Celle-ci est grossièrement homothétique à celles des pluies. Tout le littoral Ouest reçoit ainsi peu de pluies efficaces, tout l'apport étant pratiquement concentré sur les mois de décembre à avril.

Ces résultats apparaissent nettement sur l'étude fréquentielle. Une année sur dix, toute la côte sous le vent, à l'exception de la plaine des Makes, ne reçoit pas de pluie efficace ; une année sur deux, ces pluies efficaces totalisent moins de 500 mm et tombent exclusivement pendant la saison des pluies. La faiblesse de ces apports pénalise le développement économique de cette région où une partie de la population est encore tributaire des eaux de surface ou de petites sources, qui ne assurent pas une alimentation en eau continue. L'année 1983, exceptionnellement peu pluvieuse, a mis le doigt sur ce problème crucial, et sur l'intérêt de développer les recherches sur l'eau souterraine dans cette région.

Les différentes incertitudes sur ces éléments du bilan ont peu d'influence au niveau de l'évaluation globale de la pluie efficace sur l'ensemble de l'île. Cependant, chacune de ces imprécisions affecte de façon notable la pluie efficace sur des secteurs plus ou moins étendus : l'incertitude sur la valeur de l'ETP se répercute intégralement sur la pluie efficace dans les régions arrosées, mais n'affecte que très peu les régions de l'Ouest. La capacité de rétention de la réserve en eau du sol mériterait une définition précise, surtout dans les régions de pluviométrie moyenne comme les hauts de l'Ouest ou les hauts de St-Denis et ceux de St-Joseph (secteurs limites entre côte au vent et côte sous le vent). C'est dans les régions déficitaires (littoral Ouest vers Le Port) que le pas de temps mensuel entraîne une sous-estimation relative assez importante (15 %) des pluies efficaces, par rapport au bilan journalier. Si chacun des éléments pris en compte pour effectuer le bilan d'eau doit être évalué aussi précisément que possible, tel ou tel élément mérite, selon le secteur étudié, une attention particulière.

Dans la majorité des cas la pluie efficace approchée sur une unité donnée (bassin versant) par un bilan d'eau global au niveau de cette unité, ainsi qu'il est réalisé lors de l'application des modèles de simulation hydrologique utilisés, est très proche de celle calculée par bilans en chacune des mailles de cette unité. Par contre, les unités à très fort contraste pluviométrique méritent l'approche du bilan en chacune de leur maille.

Bien que les distributions des pluies et des pluies efficaces soient très voisines, l'évaluation des pluies efficaces à partir de régressions linéaires établies avec les pluies, demeure, aux différentes échelles de temps et d'espace, simplement indicative. Dans les régions défavorisées de la côte sous le vent, notamment, les pluies efficaces sont mal approchées par ces relations.

MODELISATION : CONTROLE DES DONNEES CLIMATIQUES

Les données climatiques de pluie et ETP calculées en chaque maille par les méthodes précédemment décrites, nous ont permis d'évaluer les valeurs représentatives des bassins hydrologiques étudiés (une hauteur de pluie et une hauteur d'ETP pour chacun des mois de la période considérée et pour chaque unité). Ces données nous ont permis de réaliser des simulations des débits de bonne qualité (coefficients d'ajustement souvent proches de 0.98).

Pour les pluies notamment, les résultats obtenus avec des lames d'eau calculées à partir des données aux différentes mailles sont nettement supérieurs à ceux découlant de la prise en compte des valeurs d'un poste pluviométrique du bassin considéré. Les valeurs du bassin du bras des Lianes illustrent cependant les biais dûs à la méthode d'interpolation, dans les régions à fort contraste pluviométrique et possédant peu de postes. Si le renforcement du réseau pluviométrique s'avère ainsi indispensable pour lever ces incertitudes, il paraît intéressant, au plan local, de prendre en compte toute l'information disponible (stations très incomplètes, gradients pluviométriques locaux...) non considérée pour l'étude globale.

Sur la plupart des bassins (régions à forte pluviosité), il n'a pas été possible de réduire la plage d'incertitude sur les valeurs d'ETP (10 à 20 %), ni de définir très précisément la capacité de la réserve en eau du sol (peu mise à contribution dans les régions où généralement la pluie est supérieure à l'ETP). Par contre, sur le bassin de la ravine à Marquet, représentatif des hauts de l'Ouest où la saison sèche est assez marquée, ces différentes valeurs semblent bien évaluées (correction de 5 % sur l'ETP, capacité de la réserve estimée à 150-200 mm). Ce petit bassin de la ravine à Marquet nous a montré par ailleurs que les modèles fonctionnant à pas de temps mensuels sont tout à fait aptes à simuler le

fonctionnement hydrologique des bassins de La Réunion. Même si l'épisode pluvieux est d'ordre horaire à journalier, les principaux contrastes pluviométriques et surtout hydrologiques demeurent d'ordre saisonnier. Cette constatation est bien sûr valable pour l'évaluation globale de la ressource qui nous intéresse ici, mais pas du tout transposable à des études particulières telles celles des crues.

MODELISATION : REPARTITION DES ECOULEMENTS

L'estimation de débits simulés très proches des débits observés nous donne un argument tendant à prouver la qualité des évaluations réalisées sur les données de pluie et d'ETP : c'est la première application des modèles globaux de simulation. Mais ceux-ci nous ont permis également d'expliquer le fonctionnement hydrologique des bassins étudiés, de montrer la prépondérance de tel ou tel type d'écoulement, de mettre en évidence des phénomènes de transfert d'eau souterraine.

En ce qui concerne la répartition des écoulements, il apparaît un contraste manifeste entre d'une part la rivière Langevin, la rivière des Marsouins et la ravine à Marquet dont la majorité des débits est due aux composantes souterraines, et d'autre part les autres bassins étudiés (surtout la rivière des Roches) où le ruissellement est la composante d'écoulement prépondérante.

Les caractéristiques morphologiques des bassins ne paraissent pas jouer un rôle manifeste dans la répartition de ces écoulements. Celle-ci semble par contre très liée à la perméabilité en grand des formations affleurantes. Les formations terminales du Piton des Neiges, les coulées basaltiques du Piton de la Fournaise, les éboulis et différentes formations détritiques favorisent les phénomènes d'infiltration. Par contre, les formations plus anciennes du Piton des Neiges ayant subi une altération pédologique argileuse, ou des phénomènes d'hydrothermalisation constituent des "imperméables" locaux ou régionaux. Les débits spécifiques d'infiltration varient ainsi de 82 l/s/km² sur le bassin de la rivière Langevin à 15 l/s/km² au niveau des cirques de Cilaos et Salazie.

Sur la rivière Langevin et la ravine à Marquet, les différentes simulations réalisées conduisent à considérer que près de 50 % des pluies efficaces s'infiltrent profondément et échappent ainsi au contrôle au niveau des stations de jaugeages. L'étude conjointe de la rivière des Marsouins et du Bras Cabot constitue un argument supplémentaire à l'existence de transferts d'eau souterraine entre ces deux bassins. Ce paléo-réseau hydrographique de la rivière des Marsouins collecte les eaux s'infiltrant sur l'ensemble de la plaine des Marsouins (ancien cirque colmaté par les dernières coulées du Piton des Neiges), et les concentre au niveau du réseau actuel à l'amont de Takamaka.

PERSPECTIVES DE RECHERCHES

En définitive, il apparaît que la majorité des bassins étudiés possède d'importantes potentialités en eau souterraine. Dans les régions défavorisées, tels que les hauts de l'Ouest où le renouvellement de la ressource est assez faible et concentré sur quelques mois, et sous réserve d'extrapolation des résultats du petit bassin du Dos d'Ane à l'ensemble de ce secteur, le recours aux eaux souterraines peut être une solution d'avenir. La ressource existe, mais est-elle utilisable ?

Les recherches sur la géométrie des aquifères, la définition plus précise des paramètres hydrodynamiques des formations volcaniques de La Réunion, l'existence et l'extension d'imperméables régionaux s'avèrent capitales dès à présent.

L'évaluation quantitative de cette ressource mérite également d'être approfondie. Les modèles globaux de simulation se sont avérés être de bons moyens d'estimation des différents termes du bilan d'eau sur les bassins étudiés. Les chroniques restreintes d'enregistrement du débit empêchent cependant de conclure définitivement sur la plupart de ces bassins. Reprendre ces diverses simulations à partir des chroniques complétées par les mesures réalisées depuis celles initialement considérées, permettrait d'assurer une fiabilité accrue à ces estimations. Les procédures d'extension des données seraient alors plus significatives :

- sur les bassins jaugeés, il serait ainsi possible d'estimer les débits sur une période passée à partir des données climatiques enregistrées et ainsi d'en déduire des valeurs caractéristiques des débits de cette

rivière sur une longue période (débit moyen, débit d'étiage, étude fréquentielle...),

- l'étude des relations entre les paramètres du modèle et les caractéristiques physiques des bassins étudiés permettrait de simuler les bassins non jaugés et d'évaluer l'écoulement sur l'ensemble de l'île.