

Nouvelle carte des isohyètes annuelles et des maxima pluviométriques sur le massif du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion)

New annual isohyet and rainfall maximum map for the Piton de la Fournaise massif (Reunion Island)

A. Barcelo et J. Coudray

Volume 9, numéro 4, 1996

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705262ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705262ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Barcelo, A. & Coudray, J. (1996). Nouvelle carte des isohyètes annuelles et des maxima pluviométriques sur le massif du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 9(4), 457-484. <https://doi.org/10.7202/705262ar>

Résumé de l'article

L'implantation de douze pluviographes, de 220 à 2490 mètres d'altitude, dans des sites difficilement accessibles des versants sud et est du massif du Piton de la Fournaise à la Réunion, apporte de nouveaux éléments pour le tracé des isohyètes annuelles. Un pluviographe situé à 1600 mètres d'altitude, à l'amont d'un alignement orienté sud-nord dans la zone du Baril sur la planèze sud-est du Volcan, a enregistré une précipitation annuelle supérieure à 18 000 mm en 1993. Dans cette zone, les cartes d'isohyètes moyennes inter-annuelles admises jusqu'alors présentaient des lames d'eau de l'ordre de 5000 à 6000 mm.an⁻¹. Les enregistrements obtenus en 1994 puis en 1995 sur le même pluviographe et sur des stations situées à l'est du massif à 1400 et à 1940 mètres d'altitude confirment qu'une très forte pluviométrie affecte cette zone.

Une couche d'inversion thermique est fréquemment observée par ballon-sondage entre 2000 et 2500 mètres d'altitude, principalement en hiver austral. Cette inversion est l'une des causes principales de la présence d'une zone de maximum pluviométrique située entre 1400 et 1940 mètres d'altitude sur les planèzes du Volcan. Selon la position de l'inversion, la Réunion est soit dans la situation des îles très hautes, avec des sommets émergeant des nuages, soit dans la situation des îles hautes, pour lesquelles les précipitations sont fortes près des sommets. Les fortes pentes des versants du massif et la présence de grands encaissements contribuent également à expliquer l'emplacement de la zone de maximum pluviométrique et les lames d'eau importantes qui y sont enregistrées.

Une nouvelle carte des isohyètes annuelles est proposée pour prendre en compte les nouvelles données. Une zone de maximum pluviométrique définie par l'isohyète 12 000 mm de moyenne annuelle est localisée entre 1300 et 1800 mètres d'altitude, localement jusqu'à 2000 m, sur le versant oriental du massif exposé aux vents dominants. De part et d'autre de cette zone la pluviométrie diminue: les lames d'eau moyennes annuelles décroissent jusqu'à 4000 mm au niveau de la mer, elles représentent 7000 mm au sommet à 2632 mètres d'altitude. L'atténuation rapide des précipitations sur les versants nord-ouest et sud-ouest est liée au changement de l'orientation des versants par rapport aux flux générateurs de précipitations mais sans doute également à l'influence de grandes discontinuités topographiques orientées perpendiculairement aux vents dominants.

Nouvelle carte des isohyètes annuelles et des maxima pluviométriques sur le massif du Piton de la Fournaise (île de la Réunion)

New annual isohyet and rainfall maximum map for the Piton de la Fournaise massif (Reunion island)

A. BARCELO et J. COUDRAY¹

Reçu le 7 novembre 1995, accepté le 18 juillet 1996*.

SUMMARY

Reunion island, located in the south-west Indian Ocean (21°S/55°E), is composed of 2 volcanoes linked with a hot spot activity : the Piton des Neiges massif (3069 m) in the north-west and the Piton de la Fournaise massif (2632 m) in the south-east (*Fig. 1*). Climate is intertropical and characterized by two distinct periods : the hot rainfall season, from December to April, and the rather temperate dry season from May to November. South-east to east trade winds prevail during austral winter. However, polar atmospheric disturbances occasionally affect the island. Ascending wet air masses over a rugged topography with high summits and strong slopes release intense orographic rainfalls on the windward eastern slopes of the island. This phenomenon has been reported for other islands where rainfall was shown to be correlated with altitude (ROSSIGNOL, 1990 ; OKI *et al.*, 1991). For trade winds and polar disturbances rainfalls, the maximum zone lies below the thermal inversion layer (*Table 1*). This layer, present 80% of the time, is found between an altitude of 2000 to 2500 metres in one third of cases (*Fig. 6* and *Fig. 7*). Cyclonic rainfalls, frequent during the austral summer, increase with altitude. Cyclones generate heavy rains on eastern slopes of the Piton de la Fournaise massif while they approach the island from the north-east to east sectors (MALICK and MERCUSOT, 1976 ; *Fig. 12*).

Available isohyet maps (*Fig. 3*) show a maximum rainfall zone at 860 metres, and centred on les Hauts de Sainte-Rose rain gauge, on the north-eastern slope of the Piton de la Fournaise massif. There, the average rainfall is higher than 10000 mm.year⁻¹, and decreases in the west and south directions : at the same altitude in Baril, on the south side of the massif, annual rainfall totals were estimated between 5000 and 6000 mm (Anonyme, 1975 ; BARGEAS *et al.*, 1984 ; ROBERT, 1986).

1. Laboratoire des Sciences de la Terre, Université de la Réunion, Faculté des Sciences, BP 7151, 97715 Saint-Denis Messag. Cedex 9, France.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 29 août 1997.

In 1993, twelve tipping bucket rain gauges connected to data loggers or remote transmitters have been laid between 220 and 2490 metres to precisely determine isohyets and define the presence of an altitude-dependent maximum rainfall zone (Fig. 2). On the south side of the massif, four rain gauges (altitude 650, 900, 1200 and 1600 m) form the north to south Baril transect along the main slope of the mountain.

During the first sampling year at Baril 1600, where water totals are maximum, the annual rainfall was higher than 18000 millimetres (Table 2 and Fig. 4). This constitutes the highest amount ever recorded in Reunion island. A previous record was set at les Hauts de Sainte-Rose rain gauge (15381 mm, from 1 August 1979 to 31 July 1980). Return periods over the 27 February 1993 – 26 February 1994 time interval calculated from Météo France reference rain gauge data show that the studied year was not exceptionally wet (Table 3 and Fig. 5). Since 1993, other measurements from the Baril transect, as well as from Bois Blanc and Enclos transects on the east side of the massif, suggest an under-evaluation of isohyet estimations, principally on the east and the south sides of la Fournaise volcano (Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 and Fig. 11 ; Table 4).

A comparison between the climatologic and topographic environment of Reunion island and other similar islands such as Hawaii, Maui, Kauai or Oahu in the Hawaiian archipelago (BEAN *et al.*, 1994 ; EKERN *et al.*, 1971 ; GIAMBELLUCA *et al.*, 1986 ; GIAMBELLUCA and NULLET, 1992 ; GIAMBELLUCA and SANDERSON, 1993 ; JUVIK and NULLET, 1994 ; NULLET and JUVIK, 1994 ; NULLET *et al.*, 1995 ; PETERSON, 1972 ; SCHROEDER, 1993), Tenerife in the Canary islands (CUSTODIO *et al.*, 1991), Fogo in the Cape Verde islands (JUVIK *et al.*, 1995), or Guadeloupe in the Caribbean Sea (ROBIN and ROSSIGNOL, 1988) is presented (Table 5).

In Hawaii a distinction has been made between high and very high islands. High islands (such as Oahu, Kauai, east Maui, Guadeloupe or Gran Canaria) have an elevation lower or equal to the thermal inversion layer mean altitude. Water totals are very high and located near the summits. In very high islands (such as Hawaii, west Maui, Tenerife or Fogo), with summits often higher than the thermal inversion layer, rainfalls are more moderate and located lower on windward slopes.

La Fournaise volcano experiences alternately these two situations depending on the presence, altitude and strength of the thermal inversion layer. When it is strong and low, during austral winter, rainfalls are restricted to low elevation zones. The frequent lack of thermal inversion during the hot season, or its high position when present, and the occurrence of tropical depression cause heavy rains near the summits. These elements and the presence of great embankments and steep slopes, which are increasing relief effects, contribute to give to Reunion island an original climatic and hydrologic environment. The maximum rainfall zone has a large extension in altitude, along the upper part of steep windward slopes. Recorded water totals and rainfall gradients count among stronger known.

Subsequently, atmospheric and topographic elements defining spatial rainfall variations are discussed, and a new isohyet map is proposed (Fig. 13). A maximum rainfall zone over 12000 mm.year⁻¹ is defined on the whole eastern side of the massif between 1300 and 1800 metres, and locally up to 2000 metres. Up and down of this zone, rainfall decreases to 7000 mm.year⁻¹ at the summit of the Volcano, and to 4000 mm.year⁻¹ at sea level respectively. Isohyets are nearly parallel to contour lines on all sides of the Volcano except along the north-western and south-western slopes. On the north-western part of the massif, rainfall decreases to 4000-5000 mm.year⁻¹ since slope exposure to prevailing trade winds reduces. South-western slopes rapidly become leeward, and rainfall amounts to less than 2000 mm.year⁻¹.

Key-words : reunion island, hydrology, rainfall maximum, mean annual isohyets, thermal inversion layer.

RÉSUMÉ

L'implantation de douze pluviographes, de 220 à 2 490 mètres d'altitude, dans des sites difficilement accessibles des versants sud et est du massif du Piton de la Fournaise à la Réunion, apporte de nouveaux éléments pour le tracé des isohyètes annuelles. Un pluviographe situé à 1 600 mètres d'altitude, à l'amont d'un alignement orienté sud-nord dans la zone du Baril sur la planèze sud-est du Volcan, a enregistré une précipitation annuelle supérieure à 18 000 mm en 1993. Dans cette zone, les cartes d'isohyètes moyennes inter-annuelles admises jusqu'alors présentaient des lames d'eau de l'ordre de 5 000 à 6 000 mm.an⁻¹. Les enregistrements obtenus en 1994 puis en 1995 sur le même pluviographe et sur des stations situées à l'est du massif à 1 400 et à 1 940 mètres d'altitude confirment qu'une très forte pluviométrie affecte cette zone.

Une couche d'inversion thermique est fréquemment observée par ballon-sondage entre 2 000 et 2 500 mètres d'altitude, principalement en hiver austral. Cette inversion est l'une des causes principales de la présence d'une zone de maximum pluviométrique située entre 1 400 et 1 940 mètres d'altitude sur les planèzes du Volcan. Selon la position de l'inversion, la Réunion est soit dans la situation des îles très hautes, avec des sommets émergeant des nuages, soit dans la situation des îles hautes, pour lesquelles les précipitations sont fortes près des sommets. Les fortes pentes des versants du massif et la présence de grands encaissements contribuent également à expliquer l'emplacement de la zone de maximum pluviométrique et les lames d'eau importantes qui y sont enregistrées.

Une nouvelle carte des isohyètes annuelles est proposée pour prendre en compte les nouvelles données. Une zone de maximum pluviométrique définie par l'isohyète 12 000 mm de moyenne annuelle est localisée entre 1 300 et 1 800 mètres d'altitude, localement jusqu'à 2 000 m, sur le versant oriental du massif exposé aux vents dominants. De part et d'autre de cette zone la pluviométrie diminue : les lames d'eau moyennes annuelles décroissent jusqu'à 4 000 mm au niveau de la mer, elles représentent 7 000 mm au sommet à 2 632 mètres d'altitude. L'atténuation rapide des précipitations sur les versants nord-ouest et sud-ouest est liée au changement de l'orientation des versants par rapport aux flux générateurs de précipitations, mais sans doute également à l'influence de grandes discontinuités topographiques orientées perpendiculairement aux vents dominants.

Mots clés : île de la réunion, hydrologie, maximum de pluviométrie, isohyètes moyennes annuelles, couche d'inversion thermique.

1 – INTRODUCTION

De par sa situation géographique et sa morphologie, l'île de la Réunion est soumise à des conditions climatiques extrêmement variables en fonction de l'orientation et de l'encaissement des versants et de l'altitude. Le massif du Piton de la Fournaise, volcan actif d'une superficie d'un millier de kilomètres carrés, culmine à 2 632 mètres d'altitude sur le flanc sud-est du massif du Piton des Neiges (*fig. 1*) ; son relief jeune, ses flancs pentus profondément entaillés par la

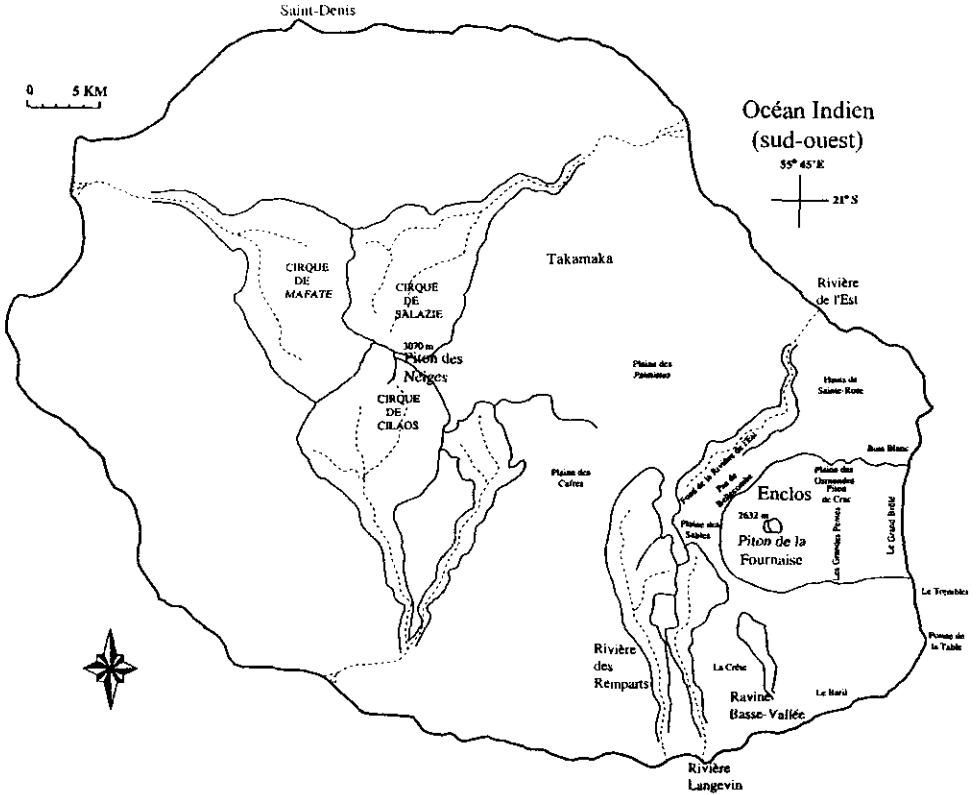


Figure 1 L'île de la Réunion, située par 21°S et 55°40'E dans le sud-ouest de l'Océan Indien, est formée de deux massifs, le Piton des Neiges (3 070 m) et le Piton de la Fournaise (2 632 m).

Reunion island, located by 21°S and 55°40'E in the south-west Indian Ocean, is composed of two volcanoes, the Piton des Neiges (3070 m) and the Piton de la Fournaise (2632 m).

tectonique et l'érosion, son exposition aux flux d'alizés de sud-est et d'est, aux dépressions tropicales et polaires sont à l'origine de conditions hydrologiques extrêmes, fortement variables dans l'espace et dans le temps.

Dans le cadre d'un programme d'évaluation des ressources en eau sur le massif du Piton de la Fournaise, douze pluviographes ont été implantés en 1993 dans des zones totalement vierges sur les flancs de ce volcan entre 220 et 2 490 mètres d'altitude (fig. 2). Cinq d'entre eux, alignés selon la ligne de plus forte pente sur la planèze sud du massif, fournissent dès la première année de fonctionnement des informations nouvelles sur l'alimentation hydrique de ce versant du massif.

La confrontation des données de ces nouveaux enregistreurs à des stations de référence et la comparaison de ces résultats aux recherches menées dans d'autres îles contribuent à l'élaboration d'une carte des isohyètes inter-annuelles sur l'ensemble du massif, présentant des différences majeures par rapport aux tracés établis précédemment.

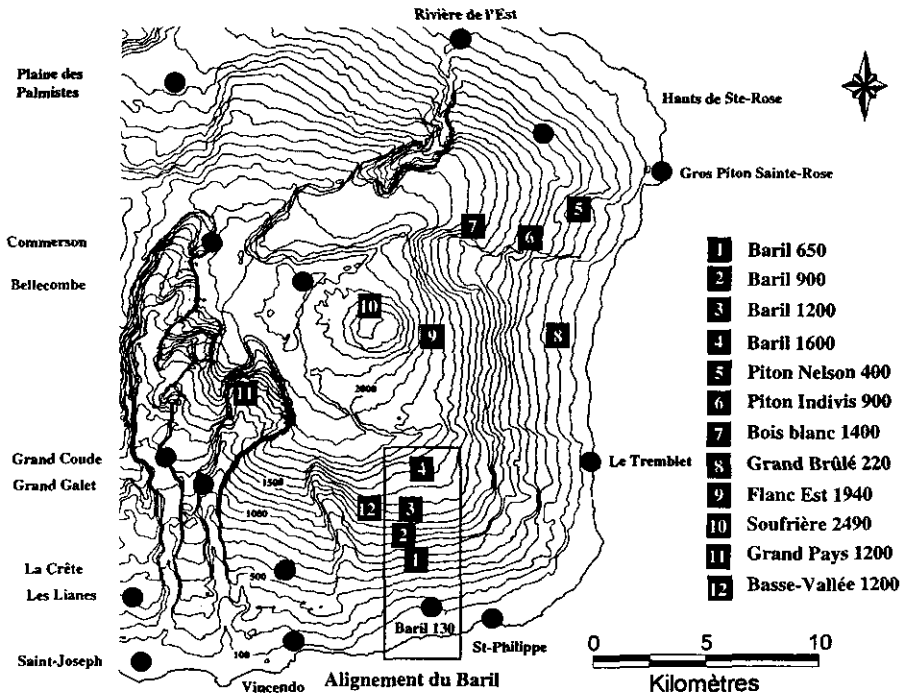


Figure 2 Situation géographique des postes pluviométriques sur le massif du Piton de la Fournaise. Les emplacements des enregistreurs gérés par Météo France sont schématisés par des disques, leurs noms sont indiqués en marge de la carte. Les stations gérées dans le cadre de l'étude sont numérotées de 1 à 12. L'alignement de pluviographes du Baril, situé au sud du massif, est encadré.

Geographic location of rain gauges on the Piton de la Fournaise massif. Discs represent Météo France rain gauges, and their names are written around the map. Sites monitored in the framework of this study are numbered from 1 to 12. The frame underlines the Baril altitudinal transect, located in the south of the massif.

2 – MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Typologie des pluies et cartes d'isohyètes inter-annuelles

Cinq régimes différents de pluies ont été répertoriés à la Réunion (ROBERT, 1986 ; tabl. 1) : les pluies d'alizés (A), les pluies de faible circulation (E), les pluies de perturbations tropicales (B), les pluies de perturbations du sud d'origine polaire (C) et les pluies de régimes pluvio-nuageux particuliers (D). Les deux premiers types sont des pluies dites « de circulation », elles ont une forte dépendance orographique ; les trois derniers types sont des pluies « de perturbations ». La variabilité des pluies sur le massif dépend dans le temps, de l'heure de la journée ou de la saison, et dans l'espace, de l'altitude, de l'orientation géographique des planètes et de la présence d'accidents topographiques. L'île, de par

Tableau 1 Typologie des pluies de ROBERT (1986), statistiques associées aux situations pluvieuses et altitude du maximum de pluviométrie sur la côte « au vent ».

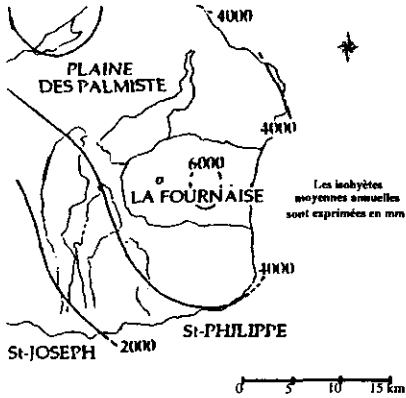
Table 1 Rainfall typology according to ROBERT (1986), statistics for rainfall situations, and elevation of the maximum rainfall zone on the windward coast.

	Type A (alizés non perturbés)	Type B (perturbations tropicales)	Type C (perturbations du sud)	Type D (régimes pluvio- nuageux particuliers)	Type E (faible convection circulation libre)	Tous régimes confondus
Situation atmosph. :						
Nombre de jours (%)	173 47,5	31 8,4	48 13,1	17 4,6	97 26,4	365 100
Jours pluvieux :						
Nombre (%)	50-130 14-36	20-25 5-7	25-35 7-10	12-15 3-4	20-60 5-16	150-250 41-68
P annuelle (mm)	500-4 500	500-2 200	400-1 300	200-1 000	1 000-1 500	2 000-8 000
Altitude du maximum pluviométrique	1 600	Maximum dans les encaissements	1 400	1 000-1 200	1 400	1 500

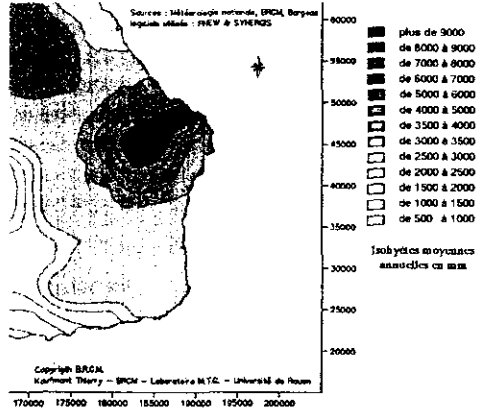
sa petite taille, n'est généralement concernée que par un seul de ces cinq types de pluies à la fois (ROBERT, 1986). Le relief contribue, pour la plupart des événements pluvieux, à créer des conditions « au vent » et « sous le vent » en fonction du secteur du flux dominant. Les précipitations affectent alors la côte « au vent » en présentant des lames d'eau croissantes depuis la côte jusqu'à une altitude seuil à partir de laquelle une décroissance est observée (tabl. 1). Seules les perturbations tropicales dérogent à ce schéma puisqu'elles intéressent généralement toute l'île, le relief et la topographie accentuant ou modérant localement les effets du météore (précipitations et vents). L'épaisseur de la zone perturbée est alors telle que ces pluies s'accroissent en fonction de l'augmentation de l'altitude sans présenter de maximum sur les versants ; ces pluies sont également très fortes dans les encaissements.

La notion de zone de maximum pluviométrique, utilisée par ROBERT (1986) pour décrire la région recevant les plus fortes lames d'eau, est définie par une surface à l'intérieur d'une isohyète fermée. Dans les contextes géographiques et climatiques de la Fournaise, la position de cette zone est en étroite relation avec l'altitude du fait d'une influence orographique dominante. Cette notion de zone est substituée à celle de ligne de maximum pluviométrique, qui rejoint les points enregistrant la plus forte pluviométrie.

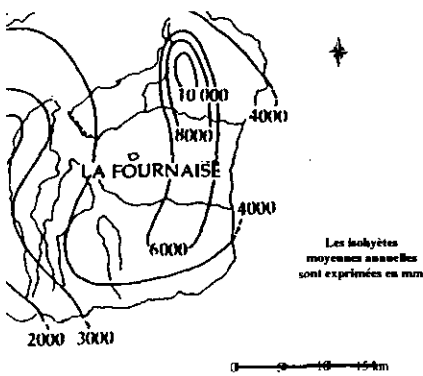
Les cartes d'isohyètes inter-annuelles récentes présentées pour le massif du Piton de la Fournaise sont au nombre de quatre (fig. 3). Les divergences de tracés qui apparaissent entre ces cartes sont le plus souvent la conséquence de l'implantation de nouveaux enregistreurs dans des zones jusqu'alors peu explorées. En 1975, le CNRS présente une carte des isohyètes (Anonyme, 1975) avec un maximum pluviométrique secondaire de 6 000 mm.an⁻¹ situé à mi-pente dans l'Enclos, la zone de plus forte pluviométrie, 7 000 mm.an⁻¹, (non visible sur la fig. 3), étant située à Takamaka sur le massif du Piton des Neiges. L'implantation du pluviomètre des Hauts de Sainte-Rose en 1973 sur le flanc nord-est du Volcan à 860 mètres d'altitude démontre rapidement l'existence d'une zone où la pluvio-



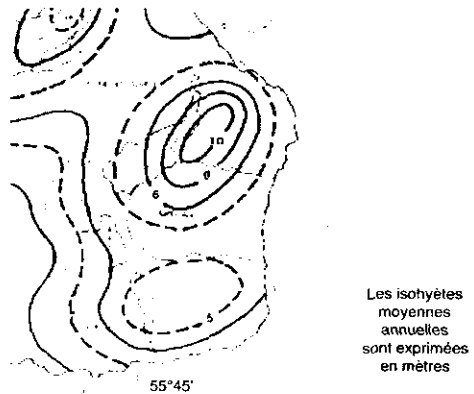
a : CNRS (in Anonyme, 1975)



b : Bargeas, 1984



c : Robert, 1986



d : Météo France (in Douville, 1992)

Figure 3 Cartes des isohyètes moyennes annuelles du massif du Piton de la Fournaise selon différents auteurs.

Mean annual isohyets maps of the Piton de la Fournaise massif according to different authors.

métrie est supérieure à cette valeur. BARGEAS *et al.* (1984) calculent les lames d'eau pour des mailles carrées de 3 km de côté, à partir des données d'un réseau de 109 pluviographes, au moyen de coefficients calés par Analyses en Composantes Principales. Ces auteurs trouvent par cette méthode une pluviométrie maximale supérieure à 9 000 mm.an⁻¹ autour du pluviographe des Hauts de Sainte-Rose. En l'absence de données d'altitude sur le Volcan, la zone de maximum reste alors localisée autour de ce pluviographe. Météo France (in DOUVILLE, 1992) élabore une carte des isohyètes à partir des seuls postes présentant des

moyennes inter-annuelles, définissant ainsi une zone de pluviométrie supérieure à 10 000 mm.an⁻¹ au nord-est du massif, mais à peine supérieure à 5 000 mm.an⁻¹ sur son flanc sud-est. ROBERT (1986), par une étude sur la typologie des pluies et sur leurs apports respectifs, place une zone de pluviométrie maximale à mi-pente du versant oriental du Volcan ; en l'absence de données sur la zone sud-est du massif, il définit des lames d'eau ne dépassant pas 6 000 mm.an⁻¹ sur ces versants.

2.2 Le réseau de mesures

Le réseau de mesures pluviométriques réunionnais géré par Météo France regroupe environ une centaine d'enregistreurs sur les 2 512 km² de l'île. Cette densité élevée masque une répartition hétérogène marquée par un faible nombre de postes d'altitude et un réseau peu développé sur le massif du Piton de la Fournaise (fig. 2). Quelques stations climatiques complètes (précipitation, température, humidité relative, rayonnement global, vent) sont gérées par le CIRAD, dont une en fonction depuis mars 1993 au Pas de Bellecombe à 2 250 mètres d'altitude.

Les 12 pluviographes, venus renforcer de façon temporaire ce réseau de base, ont été implantés en 1993 dans des sites peu accessibles des planèzes de la Fournaise et principalement en altitude (fig. 2). L'alignement des pluviographes du Baril, orienté selon la ligne de plus forte pente sur le flanc sud du Volcan, comprend quatre centrales d'acquisition de données Oedipe IV situées à 650, 900, 1 200 et 1 600 mètres d'altitude, mémorisant à la seconde près la date des basculements de pluviographes à augets. Elles permettent de disposer de données à un pas de temps variable. Les surfaces de réception étant de 400 cm² et les augets réglés à 20 grammes, un basculement équivaut à 0,5 mm. Ces centrales, spécialement développées pour fonctionner dans des conditions difficiles, ont une capacité d'enregistrement de 16 000 basculements. Une centrale d'acquisition de données Miria 3 voies (pluie, température, vent) gérée par Météo France est placée sur le même axe à 130 mètres d'altitude (tabl. 2), les données de pluie (sensibilité 0,2 mm) sont utilisables à un pas de temps de 6 minutes.

Deux Miria 2 voies (double pluviographe) et une Miria 3 voies ont été alignées en mai 1993 dans la région de Bois Blanc entre 400 et 1 400 mètres d'altitude, une dernière Miria 2 voies a été implantée dans la rivière Langevin. Les données de ces centrales sont recueillies par Météo France qui a inclus ces postes dans son réseau de mesures en temps réel.

Tableau 2 Localisation des postes pluviométriques formant l'alignement du Baril, et précipitations enregistrées du 27 février 1993 au 26 février 1994.

Table 2 Location of Baril transect rain gauges, and recorded rainfalls from 27 February 1993 to 26 February 1994.

	Gestionnaire	Altitude (mètres)	Latitude (sud)	Longitude (est)	Cumul sur la période (mm)
Baril Miria	Météo France	130	21°20'42"	55°44'18"	> 3 988,0
Baril 650	Université	650	21°19'40"	55°43'45"	11 612,5
Baril 900	Université	900	21°19'10"	55°43'35"	13 339,0
Baril 1200	Université	1 200	21°18'40"	55°43'45"	14 058,5
Baril 1600	Université	1 600	21°17'35"	55°44'00"	18 029,5

Trois autres pluviographes ont rejoint en novembre 1992 le réseau de télé-surveillance de la Fournaise géré par l'Observatoire du Volcan. Ces enregistreurs sont situés dans l'Enclos à 220, 1 940 et 2 490 mètres d'altitude (fig. 2) ; les données de pluie (sensibilité 0,5 mm) sont utilisables au pas de temps de la minute. Ces postes n'ont été fiables qu'à partir de décembre 1993, des lacunes de télé-transmission sont cependant encore fréquentes.

2.3 Données pluviométriques et climatologiques

Mis en service début février 1993, les quatre pluviographes Oedipe IV de l'alignement du Baril ont enregistré entre le 27 février 1993 et le 26 février 1994 des lames d'eau très importantes (tabl. 2 ; fig. 4). Le pluviographe Baril 1600 a enregistré 17 647 mm sur la période malgré un bouchage progressif avec débordement entre le 6 mai et le 22 juin 1993 ; l'ajout de la lame d'eau accumulée dans l'impluvium mais non enregistrée porte ce total à plus de 18 000 mm. Au Baril 1200, les précipitations enregistrées atteignent 11 719 mm malgré deux mois de lacunes totales du 24 juin au 24 août. Durant ces deux mois, Baril 1600 et 900 ont enregistré respectivement 2659 et 1953 mm. Le total annuel au Baril 1200 atteint donc certainement 14 000 mm. Le poste Baril 900 enregistre 13 089 mm, mais connaît une panne du 26 janvier au 6 février 1994 durant laquelle Baril 1200 et 650 reçoivent respectivement 445 et 389 mm : la précipitation totale estimée au Baril 900 atteint donc 13 500 mm. Le pluviographe Baril 650 enregistre plus de 11 600 mm.

Ces valeurs sont à rapprocher des données du seul poste situé à mi-pente sur la façade « au vent » de la Fournaise, les Hauts de Sainte-Rose, qui enregistre, durant la même période, une lame d'eau supérieure à 12 900 mm (tabl. 3). Le poste Baril 130 recueille près de 4 000 mm malgré trois mois de lacunes en avril et mai 1993 puis en février 1994 (tabl. 2).

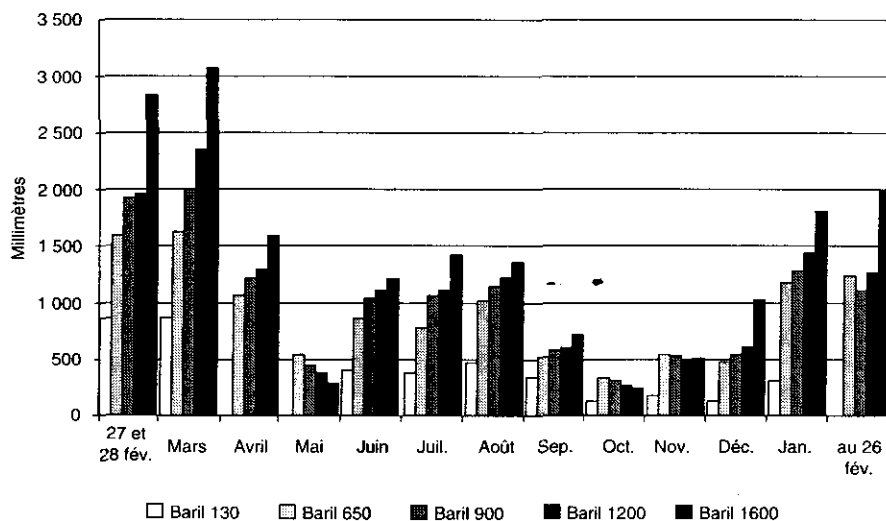


Figure 4 Précipitations mensuelles (de février 1993 à février 1994) enregistrées par les cinq pluviographes constituant l'alignement du Baril.

Recorded monthly rainfalls (from February 1993 to February 1994) for five rain gauges along the Baril transect.

Avec plus de 18 000 mm sur les douze mois d'observation, les précipitations au Baril 1600 dépassent d'environ 2 600 mm l'ancien maximum annuel de pluie réunionnais relevé sur les Hauts de Sainte-Rose (15 381 mm du premier août 1979 au 31 juillet 1980).

Les périodes de retour des précipitations des 12 mois, entre le 27/02/93 et le 26/02/94, sont calculées pour 9 postes répartis sur le massif présentant des séries complètes de 16 à 37 années, par ajustement à une loi Log-normale (tabl. 3). Les précipitations sur les Hauts de Sainte-Rose atteignent une période de retour de 7 ans (fig. 5). Les résultats caractérisent une année excédentaire, particulièrement marquée sur le flanc sud-ouest du massif, notamment à la Crête où le seuil des pluies décennales a été dépassé. La période de retour des précipitations pour la zone du Baril est sans doute comprise entre les extrêmes observés sur le massif, soit 3 et 12 années. Les précipitations au Baril 1600 sont supérieures aux lames d'eau enregistrées sur les autres postes. Cette caractéristique se vérifie d'ailleurs en 1994 puis en 1995 : plus de 17 400 mm sont par exemple recueillis du 11 mai 1994 au 10 mai 1995 malgré des lacunes.

Les autres postes situés sur le flanc est du massif, notamment Soufrière (2 490 m), Flanc Est (1 940 m) et Bois Blanc 1400 (fig. 2), sont d'un grand intérêt pour la localisation de la zone de maximum pluviométrique. Ils ont été mis en fonction après ceux du Baril et ne recouvrent pas toute la période d'étude. Leurs données présentent des lacunes (télétransmission hertzienne dans des conditions difficiles) et la comparaison entre les différentes lames d'eau recueillies sur des durées continues supérieures à quelques semaines s'avère difficile.

Tableau 3 Caractéristiques de neuf postes de référence gérés par Météo France sur le massif du Piton de la Fournaise.

Table 3 Characteristics of nine reference rain gauge stations managed by Météo France on the Piton de la Fournaise massif.

	Localisation		Statistiques			Année 1993-94		
	Altitude (mètres)	Position sur le massif	Nombre d'années complètes	Maximum annuel (mm)	Moyenne annuelle (mm)	Ecart-type (mm)	Total (mm)	Période de retour (années)
Rivière de l'Est	195	nord	37	7 390 (1979-80)	4 705	1 044	5 560	5
Hauts de Sainte-Rose	860	nord-est	19	14 972 (1991-92)	10 545	2 282	12 927	7
Bellecombe	2 250	centre-ouest	22	11 096 (1979-80)	5 204	1 944	5 868	3
Tremblet	120	est	36	7 059 (1986-87)	4 337	949	4 786	3
Grand Galet	420	sud-ouest	32	5 356 (1963-64)	3 212	1 047	4 640	12
La Crête	650	sud	20	6 981 (1979-80)	4 819	1 215	> 5 281	> 3
Vincendo	140	sud	21	5 104 (1986-87)	2 977	834	> 3 959	> 8
St-Philippe	27	sud	37	5 687 (1986-87)	3 753	828	4 413	5
Commerson	2 320	nord-ouest	16	9 384 (1979-80)	3 654	1 978	4 418	3

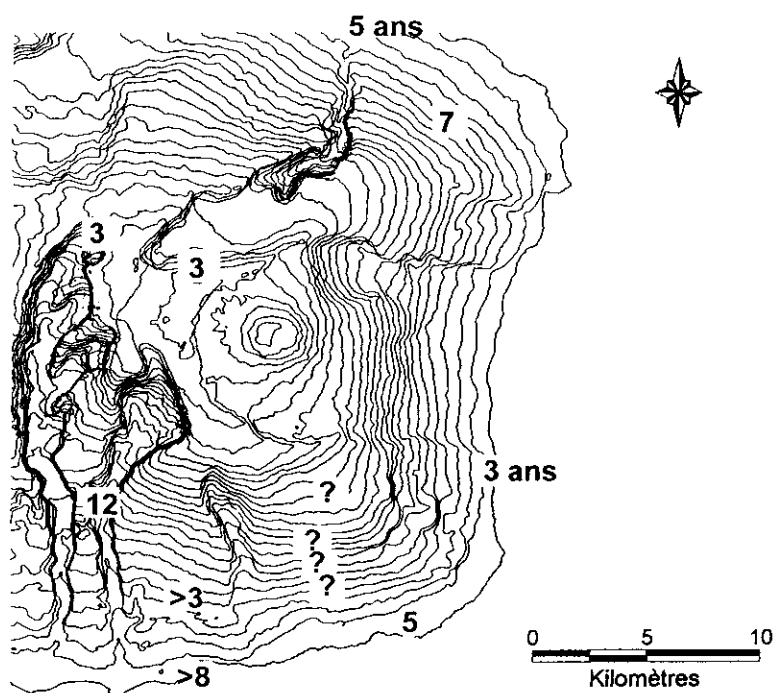


Figure 5 Représentation cartographique des périodes de retour des précipitations du 27 février 1993 au 26 février 1994 pour neuf postes pluviométriques gérés par Météo France sur le massif du Piton de la Fournaise.

Cartographic representation of precipitation return period from 27 February 1993 to 26 February 1994 for nine reference rain gauges managed by Météo France on the Piton de la Fournaise massif.

Depuis septembre 1992, soixante sept lâchers de ballons depuis Saint-Denis, réalisés par le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère de l'Université de la Réunion, complètent les informations climatiques recueillies « au sol ». Les profils de température et d'humidité relative correspondants, tracés pour les besoins de cette étude depuis le sol jusqu'à l'altitude de quatre kilomètres, mettent en évidence la présence, dans environ 80 % des cas, d'une couche d'inversion thermique associée à une chute de l'humidité relative. En hiver austral, cette inversion est fréquente, elle est plus basse et plus marquée qu'en été où de nombreux profils sont difficilement interprétables. Dans les cas les plus nets, la différence de température atteint jusqu'à 8 °C et la chute d'humidité relative peut être égale à 70 % en quelques centaines de mètres. Cette inversion oscille dans un tiers des cas entre 2 000 et 2 500 mètres d'altitude, et elle est observée une fois à seulement 1 500 mètres. Les profils de température et d'humidité relative sont présentés, à titre d'exemple, pour la journée du premier juin 1995 où l'inversion est très marquée (fig. 6). Le lâcher de ballon est réalisé à 11 heures locales ; le flux d'aizés de secteur NE est d'intensité modérée, environ 20 km.h⁻¹. La carte des isohyètes sur la Fournaise pour cette journée montre que les lames d'eau maximales sont faibles et situées à basse altitude ; les enregistreurs implantés en altitude ne reçoivent quasiment aucune précipitation (fig. 7).

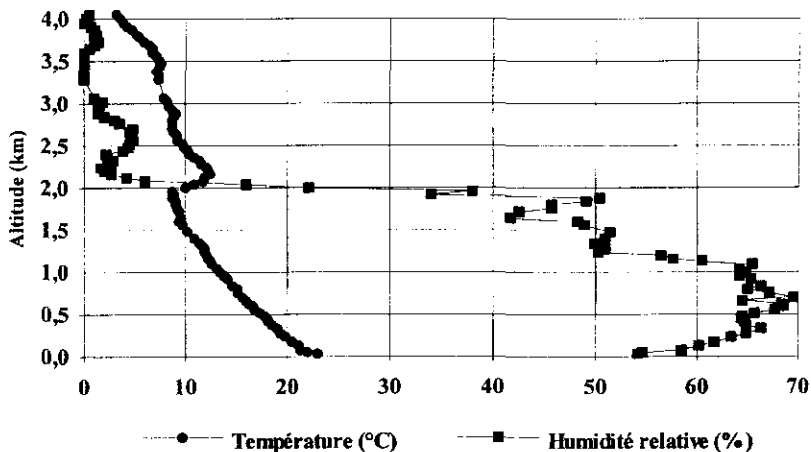


Figure 6

Profils de température et d'humidité relative au-dessus de Saint-Denis de la Réunion le premier juin 1995. L'île est sous l'influence d'un flux d'alizés de secteur NE d'une vitesse de 20 km.h^{-1} . Une inversion thermique très marquée est située à environ 2 kilomètres d'altitude, l'écart de température atteint à peu près 4°C , le taux d'humidité relative chute à moins de 5%. Dans ces conditions atmosphériques, l'inversion thermique bloque le développement nuageux en altitude.

Relative humidity and temperature profiles over Saint-Denis in Reunion island the 1 June 1995. Trade wind comes from NE at 20 km.h^{-1} . A strong thermal inversion is located at 2 kilometres in elevation, the difference of temperature reaches nearly 4°C and the relative humidity rate falls to less than 5%. Regarding these atmospheric conditions, the thermal inversion stops cloud development upward.

La chute d'humidité relative liée à cette inversion thermique est parfois enregistrée à la station climatique du Pas de Bellecombe située à 2 250 mètres d'altitude, malgré les limites des mesures « au sol » : la convection qui engendre les débordements nuageux en journée, et l'évaporation de l'eau du sol après les pluies. Pour 3 % des données horaires au Pas de Bellecombe, les taux d'humidité relative sont inférieurs à 10 %, dans 16 % des cas inférieurs à 50 %. En fin d'hiver austral, en novembre, dans 8 % et 36 % des cas, l'humidité relative est respectivement inférieure à 10 % et 50 %.

3 – RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 La pluviométrie fonction de l'altitude

En 1964, Toucheboeuf de Lusigny et Le Gourrières plaçaient une zone de maximum pluviométrique entre 800 et 1 400 mètres d'altitude et notaient une décroissance plus marquée des précipitations à partir de 1 800 mètres. Robert (1986) établit la répartition des précipitations en fonction de l'altitude selon les différents types de pluies qu'il a définis. A partir des lames d'eau moyennes annuel-

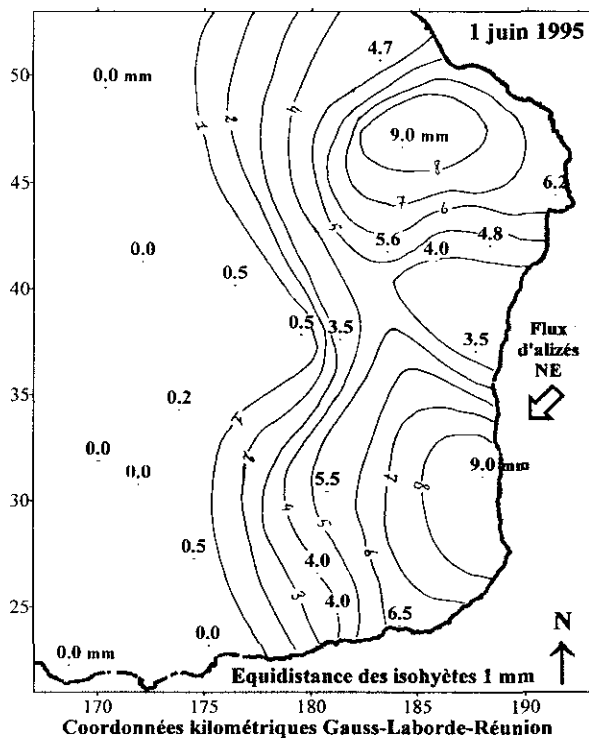


Figure 7

Carte des isohyètes du premier juin 1995 (en mm, origine 7 heures). Les postes de basse altitude enregistrent les précipitations les plus importantes du fait de la présence de la couche d'inversion thermique. Les lames d'eau, qui restent faibles en toutes zones, sont maximales sur les pentes orientées face au flux d'alizés de secteur NE.

Isohyet map for 1 June 1995 (in mm, 7-hour origin). Low elevation rain gauges record heavier rainfalls because of the thermal inversion layer presence. Water totals are low everywhere but maximum on slopes facing NE trade winds.

les de chacun des types de pluies, il situe l'emplacement du maximum de pluviométrie vers 1 500 mètres d'altitude sur les flancs du Volcan, soit environ à mi-pente (tabl. 1).

Les lames d'eau annuelles enregistrées sur l'alignement de pluviographes de la zone Baril montrent une augmentation des précipitations avec l'altitude jusqu'au poste le plus élevé situé à 1600 mètres (tabl. 2). Sur l'alignement de pluviographes de Bois Blanc, on enregistre également des lames d'eau croissantes jusqu'à 1400 mètres d'altitude. Deux séries de données d'une durée de cinq mois, de mai à septembre 1994 puis 1995, choisies pour le faible pourcentage de lacunes illustrent cette répartition (fig. 8). Ces profils de pluies globalement croissants selon l'altitude observés au Baril et à Bois Blanc sont cependant inversés en saison sèche (fig. 4) du fait de la présence de la couche d'inversion thermique.

Les 564 couples de pluies journalières sans lacune pour les postes Baril 900 et Piton Nelson 900 sont relativement peu corrélés ($r = 0,82$). Les lames d'eau tota-

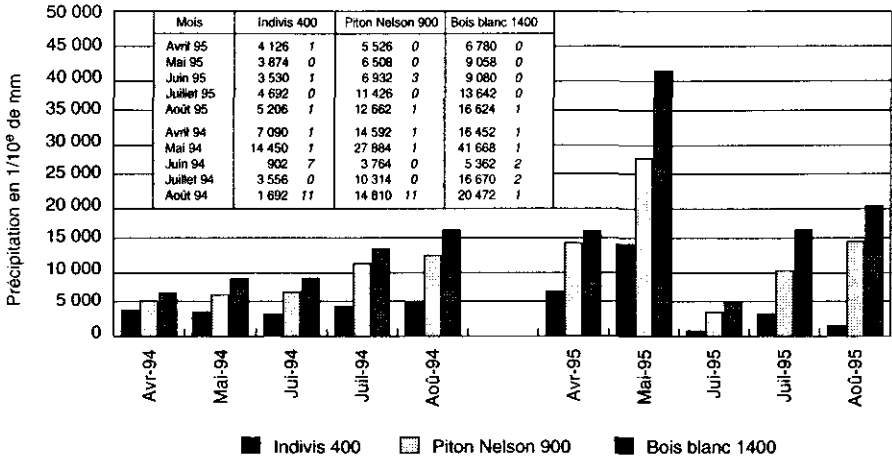


Figure 8 Précipitations mensuelles (en 1/10^e mm) et pourcentage de lacunes pour les postes de l'alignement de Bois Blanc.

Monthly rainfalls (in tenth mm) and gap percentage for the Bois Blanc altitudinal transect.

les sont néanmoins presque identiques, respectivement 18 897 et 19 268 mm, soit moins de 2 % de différence (tabl. 4). Du fait de leur position sur le massif, ces pluviographes enregistrent de façon préférentielle les pluies pour des flux de secteurs sud-est et est respectivement, ce qui explique la faible corrélation observée précédemment. L'occurrence de flux dominants provenant de ces secteurs étant à peu près égale, ces postes enregistrent des lames d'eau proches du fait de leur altitude identique. Les postes Baril 900 et Hauts de Sainte-Rose (860 m) présentent pour la même raison des lames d'eau annuelles comparables (tabl. 3). A l'altitude de 900 mètres, malgré des pluies journalières peu corrélées, les totaux pluviométriques sont peu différents depuis le Baril au sud-est du massif, jusque dans les Hauts de Sainte-Rose dans le nord-est.

Tableau 4 Statistique des totaux pluviométriques journaliers pour les postes du Baril, de l'Enclos et de Bois Blanc.

Table 4 Daily rainfall data couple for Baril, Enclos and Bois Blanc rain gauges.

	Nombre de données journalières communes	Lacune maximale pour les données journalières	Coefficient de corrélation	Lames d'eau (mm)	Différence
Baril 900				18 897,5	
Piton Nelson 900	564	0 %	0,82	19 268,6	2,0 %
Baril 1600				20 868,5	
Flanc Est 1940	346	20 %	0,92	20 340,0	2,6 %
Baril 1600				18 453,5	
Bois Blanc 1400	398	20 %	0,88	18 294,2	0,9 %
Bois Blanc 1400				18 189,6	
Flanc Est 1940	341	20 %	0,91	18 303,0	0,6 %

Près du sommet, les données du pluviographe Soufrière (2 490 m) démontrent une nette diminution des pluies. La pluviométrie est donc croissante jusque vers 1 400 à 1 600 mètres sur le versant « au vent » de la Fournaise.

Sur la façade « au vent » du massif, seul le pluviographe Flanc Est 1940 se trouve à une altitude intermédiaire entre les postes Baril 1600 et Soufrière 2490. Les chroniques de données enregistrées par ce capteur comportent de nombreuses lacunes, mais font apparaître une forte pluviométrie. Les chroniques communes utilisables semblent néanmoins confirmer l'hypothèse d'une pluviométrie du même ordre de grandeur qu'au Baril 1600 ou qu'à Bois Blanc 1400 (tabl. 4). L'extraction de données journalières présentant moins de 20 % de lacunes fournit 341 couples communs entre Flanc Est 1940 et Bois Blanc 1400 dont les totaux respectifs diffèrent seulement de 0,6 % ; la différence calculée à partir de 346 couples est égale à 2,6 % entre Flanc Est 1940 et Baril 1600 ; enfin les lames d'eau issues de la somme des valeurs des 398 couples communs entre Baril 1600 et Bois Blanc 1400 s'éloignent de 0,9 %. Même si de fortes différences apparaissent au niveau des données journalières en raison de la direction du flux et de la typologie des précipitations, les lames d'eau totales sont très proches entre les postes Baril 1600, Bois Blanc 1400 et Flanc Est 1940. Il n'est donc pas possible de définir précisément l'altitude du maximum de pluviométrie. A partir de ces trois points, une zone de maximum pluviométrique est cependant localisée sur le versant oriental de la Fournaise.

Cette zone de maximum de pluviométrie située vers la mi-pente des versants « au vent » est liée en partie à la présence, à cette altitude, de la couche d'inversion thermique mise en évidence par ballon-sondages et par des mesures « au sol » au Pas de Bellecombe. L'étude de la répartition des lames d'eau précipitées durant quelques épisodes choisis pour leur représentativité apporte des éléments de réponse sur les mécanismes d'apparition des pluies. Le contexte climatique du premier juin 1995 décrit précédemment (fig. 6 et fig. 7) marque une situation extrême avec une inversion forte et basse. La carte des isohyètes du 19 mars 1995 (fig. 9) est représentative d'une journée pluvieuse marquée par un flux d'alizés de secteur ESE à E. Le vent moyen est de 15,5 km.h⁻¹ au Pas de Bellecombe, tandis que l'humidité relative horaire est forte, souvent égale à 100 %. L'inversion thermique n'est pas mise en évidence « au sol », et, en l'absence de ballon-sondage, sa présence n'est pas vérifiée plus haut. Les pluies enregistrées au sommet confirment l'absence d'inversion thermique à cette altitude. Classiquement, les précipitations sont faibles au niveau de la mer et à l'ouest du massif. La pluviométrie est maximale face au flux dominant, dans la région de Bois Blanc, à une altitude voisine de 900 mètres. Au Baril, la pluviométrie est plus faible et l'altitude du maximum plus basse. Le flux dominant, établi au secteur ESE à E, est bloqué et guidé par le relief le long de la pente dans la région de Bois Blanc : ce soulèvement des masses d'air est à l'origine de précipitations orographiques fortes. Le phénomène orographique est moins marqué dans la région du Baril car une partie du flux peut contourner l'île par le sud : la zone de maximum pluviométrique est située à une altitude inférieure et les lames d'eau sont moins importantes.

Le mois de mai 1994 est choisi pour représenter la répartition des lames d'eau sur le massif. Durant cette période, 16 jours sont caractérisés par un alizé dominant (A) et 10 jours sont classés en faible circulation (E). Deux journées sont marquées par des régimes pluvio-nuageux (D), et deux fronts froids (C) intéressent l'île. Le flux dominant s'établit de façon majoritaire au secteur est (9 jours) ; il est

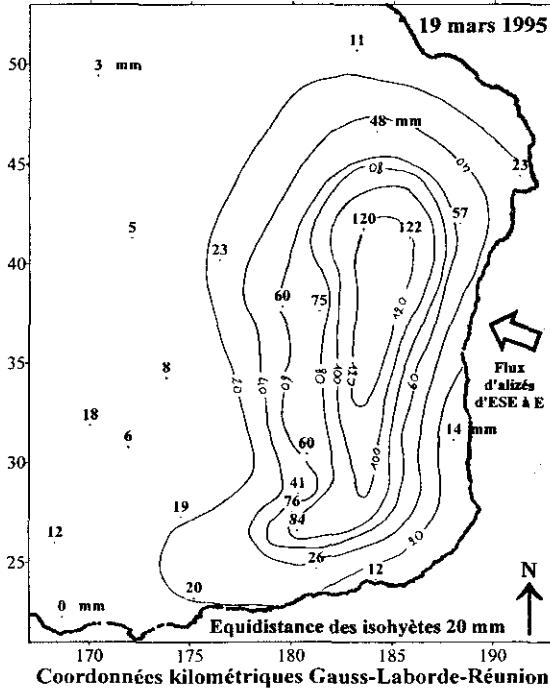


Figure 9

Carte des isohyètes du 19 mars 1995 (en mm, origine 7 heures) représentative d'une situation d'alizés classique. L'île est sous l'influence d'un flux d'alizés de secteur ESE à E. La couche d'inversion thermique n'est pas mise en évidence au sol. Les pluies sont faibles au niveau de la mer et sur la façade « sous le vent ». La zone de maximum pluviométrique est observée au-dessus de 900 mètres d'altitude dans la région de Bois Blanc, un peu plus bas au Baril.

Isohyet map for 19 March 1995 (in mm, 7-hour origin) representative of a typical trade wind situation. The island is under an ESE to E sector trade wind flux. Rainfalls are low at sea level and on the leeward slopes. The maximum rainfall zone is observed over 900 metres in elevation at Bois Blanc, but lower at Baril.

compris entre les secteurs SE et NE durant 24 jours. Les lames d'eau mensuelles enregistrées sont déficitaires pour 7 postes sur les 11 possédant une moyenne inter-annuelle, 4 postes situés au sud et à l'ouest du massif présentent des lames d'eau excédentaires (fig. 10). Deux ballon-sondages sont réalisés durant ce mois. Le 10 mai, l'inversion est présente à environ 1 800 mètres d'altitude, les données d'humidité au Pas de Bellecombe atteignent ce jour la valeur la plus faible du mois (28 %), les pluies sont nulles ou très faibles en toutes zones ; le 26 mai une inversion très peu marquée est observée à 2 800 mètres. La carte des isohyètes, réalisée à partir des données des 24 postes en service, est tracée manuellement pour tenir compte de l'influence prépondérante du relief. Les 1 157 millimètres enregistrés au pluviographe Flanc Est 1940 ont été portés à 1 340 mm, du fait de la présence de 16 % de lacunes de télétransmission, par l'ajout des produits de la pluie journalière par le pourcentage de lacune correspondant.

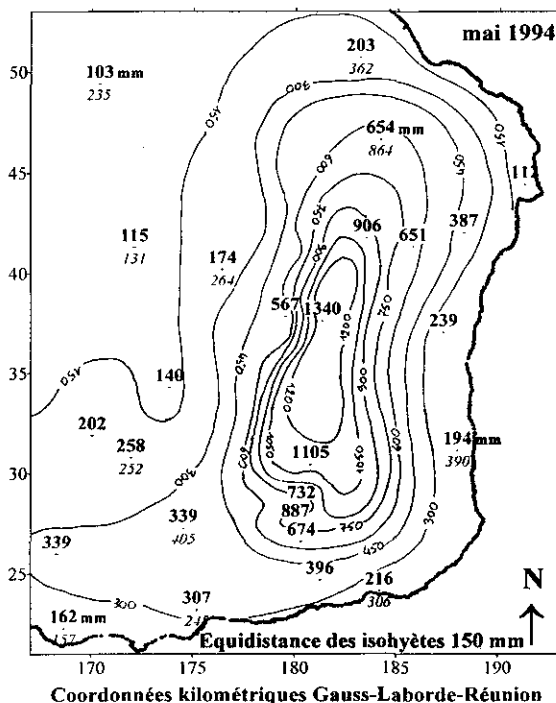


Figure 10 Isohyètes du mois de mai 1994 (en mm, origine 7 heures) tracées à partir de tous les postes en service sur le massif. Sur le versant oriental du massif, l'influence orographique est prédominante pour l'apparition des précipitations ; les isohyètes sont pratiquement parallèles aux courbes de niveau. Les précipitations maximales sont centrées sur l'Enclos et situées assez haut autour du pluviographe Flanc Est 1940.

Isohyet map for May 1994 (in mm, 7-hour origin) compiling data from the complete rainfall measurement network. On the eastern slopes of the massif, the orographic influence is dominant for rainfall appearance ; isohyets are nearly parallel to contour lines. Maximum rainfalls are centered on the Enclos area, and located quite high around Flanc Est 1940 rain gauge.

Une zone de pluviométrie maximale apparaît dans l'Enclos au sommet des Grandes Pentés (fig. 10) autour du pluviographe Flanc Est 1940. Cette zone englobe les versants orientaux de la Fournaise exposés aux vents dominants et déborde plus largement vers le sud-est au niveau du Baril.

Les cartes des isohyètes du mois de mai 1994 tracées à partir des sorties du modèle BARGEAS (BARGEAS *et al.*, 1984) et par Météo France sous-estiment fortement les lames d'eau dans l'Enclos et sur le versant sud-est du massif (fig. 11). Le modèle Bargeas interpole les lames d'eau enregistrées par 109 postes de référence, sur des mailles carrées de 3 kilomètres de largeur, au moyen des coefficients d'une analyse en composantes principales (ACP). L'augmentation des précipitations avec l'altitude près de la zone du maximum de pluviométrie est modélisée de façon incorrecte, le gradient des pluies avec l'altitude est même inversé dans l'Enclos. La sous-estimation des lames d'eau dans la région de l'Enclos et sur le versant SE du massif provient de l'absence d'enregistreur dans

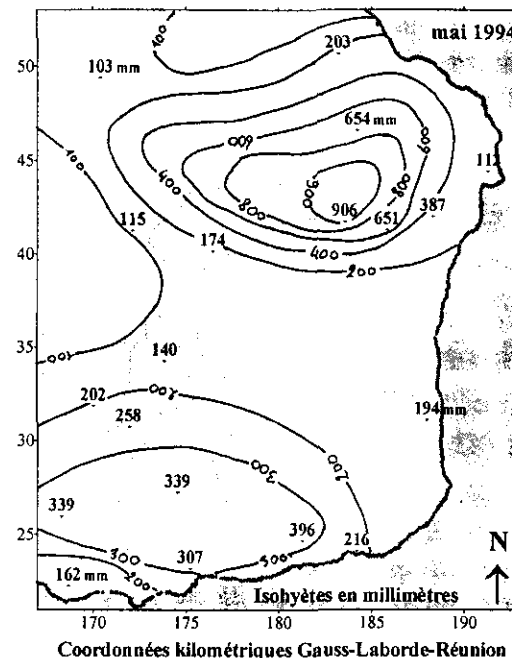
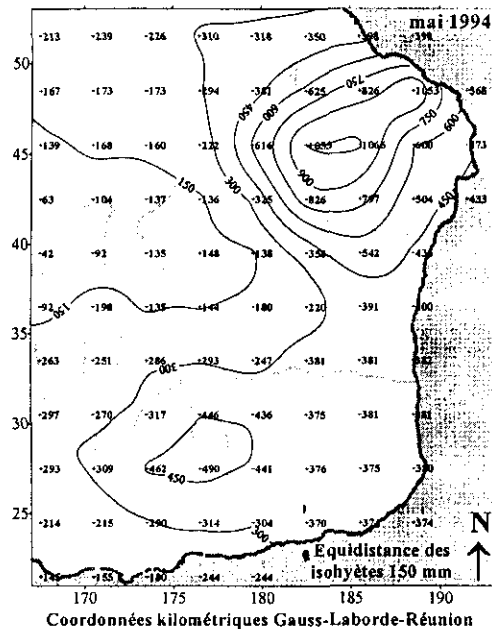


Figure 11

Isohyètes du mois de mai 1994 (en mm, origine 7 heures) selon le modèle Bargeas (à gauche) et Météo France (à droite, redessiné à partir de Anonyme, 1994). Les résultats issus du modèle Bargeas sous-estiment les précipitations sur les façades est et SE, l'effet orographique n'est pas pris en compte, le gradient pluviométrique est même inversé au niveau de l'Enclos. Météo France à partir de son réseau de mesures sous-estime également les lames d'eau dans l'Enclos et sur le versant SE.

May 1994 isohyet map (in mm, 7-hour origin) according to Bargeas model (left) and Météo France (right, redrawn from Anonyme, 1994). Results of Bargeas model under-estimate rainfalls on E and SE slopes, orographic effect is not taken into account, rainfall gradient is even reversed in the Enclos area. Météo France too, with its measurement network, under-estimates water totals in the Enclos area and on SE slopes.

cette zone. Le réseau mis en place confirme donc les hypothèses d'une influence orographique dominante dans ces zones et d'une pluviométrie plus forte à la mi-pente des versants « au vent ». La zone de l'Enclos semble par ailleurs bénéficier d'une position privilégiée pour l'apparition des précipitations.

3.2 Spécificité de la planèze sud-est du Volcan

La zone du Baril reçoit les précipitations d'alizés provenant des secteurs sud à est. ROBERT (1986) comptabilise un nombre annuel moyen de jours de pluies d'alizés compris entre 50 et 130 sur la façade orientale du Volcan (*tabl. 1*). L'apport de ces pluies est considérable, plus de 4 000 mm.an⁻¹ en moyenne dans les Hauts de Sainte-Rose ; le versant sud-est reçoit sans doute des lames d'eau du même ordre de grandeur. Lorsque le flux dominant s'établit aux secteurs nord-est à nord, la zone du Baril se trouve « sous le vent » et ne reçoit que peu ou pas de précipitations.

Les perturbations tropicales ou les cyclones abordent l'île, dans la majeure partie des cas, entre les secteurs ENE et N (MALICK et MERCUSOT, 1976). Le flux dominant qui intéresse l'île s'établit donc du secteur SSE au secteur E ; la zone du Baril se trouve alors principalement intéressée par un flux d'alizés fortement perturbé et humide lorsque l'île n'est pas encore sous la zone d'influence du météore, puis par la masse nuageuse de la perturbation. Il en résulte des pluies considérables sur les planèzes du sud-est durant les deux ou trois jours précédant l'arrivée de la plus grande part des perturbations intéressant l'île (*fig. 12*).

Les pluies de fronts d'alizés et des perturbations polaires qui approchent la Réunion durant l'hiver austral représentent un apport en eau non négligeable pour la partie sud-est de l'île. Elles contribuent ainsi à diminuer dans cette zone l'écart de pluviométrie entre les saisons sèche et humide (BARGEAS *et al.*, 1984).

3.3 Atténuation des précipitations vers l'ouest

Dans la majorité des situations météorologiques qui la concerne, la Réunion est soumise à des flux provenant globalement du secteur ESE. Les auteurs ayant travaillé sur ce sujet mettent en évidence une diminution des quantités précipitées d'est en ouest : c'est le cas de ROBERT (1986) au moyen de régressions linéaires, ou encore de DOUVILLE (1992) par Analyses en Composantes Principales. Les situations décrites précédemment mettent nettement en évidence cet effet (*fig. 7, fig. 9 et fig. 10*). L'atténuation des précipitations d'est en ouest sur le flanc sud du Volcan se produit rapidement ; le poste d'altitude situé le plus à l'est sur ce versant (La Crête, 650 m) reçoit une lame d'eau moyenne d'environ 4 800 mm.an⁻¹, alors que les précipitations moyennes estimées au Baril 650, situé 6 km plus à l'est, sont de l'ordre de 8 000 mm.an⁻¹. L'atténuation des précipitations est soit progressive, liée au changement d'orientation du versant, soit brutale par la présence d'un obstacle comme peut l'être le rempart de Basse-Val-lée, ou dépendre des deux facteurs ; l'absence d'enregistreur dans cette zone ne permet pas de trancher entre ces hypothèses. Au nord du massif, une situation similaire est observée mais la densité de pluviographes est insuffisante pour caractériser correctement la diminution des lames d'eau. Selon Météo France (*fig. 3*), la pluviométrie décroît de 10 000 mm.an⁻¹ dans les Hauts de Sainte-Rose, à moins de 5 000 mm.an⁻¹ à la même altitude sur les reliefs bordant la Plaine des Palmistes au nord-ouest du massif. Là encore, le changement de pente des versants, créant localement des conditions « sous le vent », et sans doute la présence du rempart de la Rivière de l'Est sont responsables de cette décroissance.

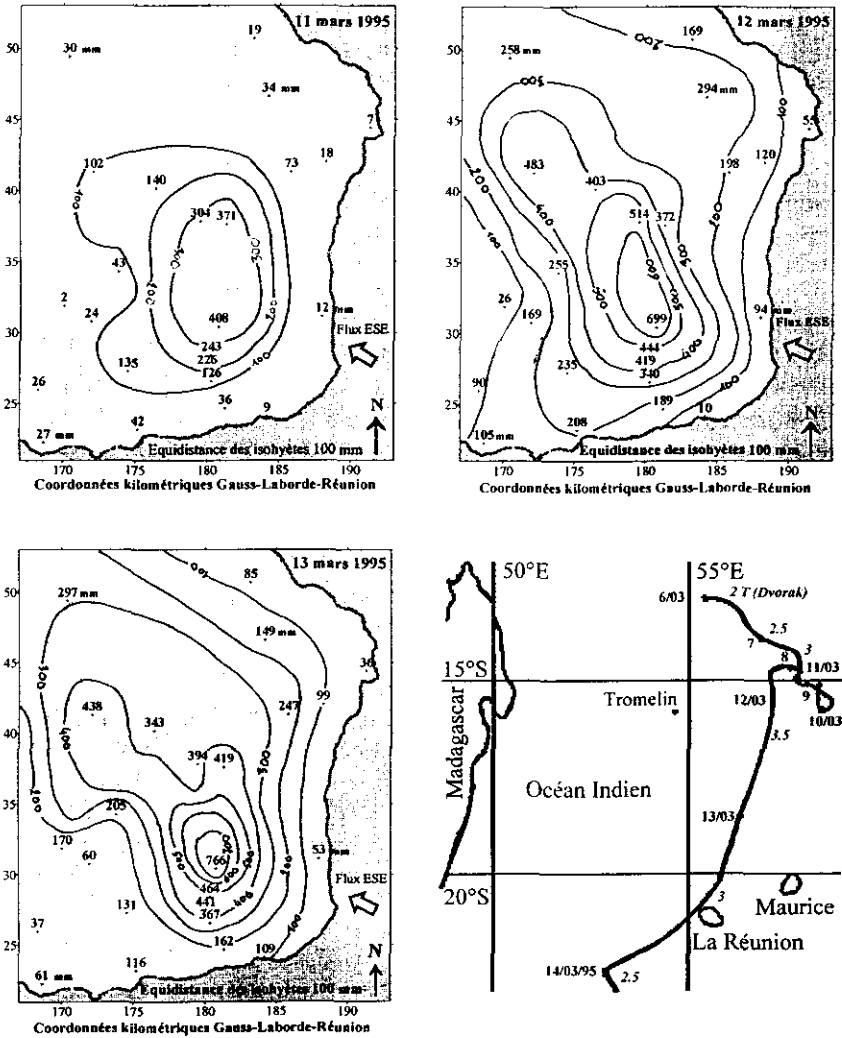


Figure 12

Cartes des isohyètes (en mm, origine 7 heures) des 11, 12 et 13 mars 1995 représentatives de l'approche d'une dépression tropicale (tempête tropicale modérée Kylie), et trajectoire du météore (ANONYME, 1995). A partir du 11 mars, Kylie suit une trajectoire NNE-SSO à peu près constante en direction de la Réunion. Le flux d'alizés de secteur ESE se renforce progressivement et devient de plus en plus instable. Les versants sud et est de la Fournaise reçoivent de fortes précipitations dans les jours précédant l'arrivée des masses nuageuses directement associées au système dépressionnaire, puis au cours de leur passage.

Isohyet maps (in mm, 7-hour origin) for 11, 12 and 13 March 1995 representative of a tropical depression approach (Kylie moderate tropical storm), and storm track map (ANONYME, 1995). Kylie follows a NNE-SSO track when approaching Reunion island. The east sector trade wind flux gets progressively stronger and unstable. South and east slopes of la Fournaise receive heavy rainfalls some days before (and during) the arrival of the storm cloud mass.

3.4 Confrontation à d'autres sites

Le contexte pluviométrique de la Réunion trouve son équivalent sur certaines îles hautes en domaine tropical et subtropical. La présence d'une zone de maximum pluviométrique située plus bas que le sommet est fréquente pour les îles dont le relief dépasse l'altitude moyenne de l'inversion thermique qui sépare la couche marine humide de l'air sec supérieur. Au niveau de l'archipel hawaïen, cette couche d'inversion thermique est présente pour environ 70 % du temps entre 1 800 et 2 400 mètres (NULLET *et al.*, 1995). NULLET et JUVIK (1994) lient la présence de cette couche d'inversion thermique à la circulation générale de l'atmosphère et au fonctionnement de la cellule de Hadley. Les conséquences de la présence de cette limite sont nombreuses au niveau climatique, tant pour la pluviométrie que pour l'ETP, qui atteint alors des valeurs très fortes en altitude du fait du pouvoir évaporant élevé de la masse d'air sèche (GIAMBELLUCA et NULLET, 1992 ; BEAN *et al.*, 1994 ; JUVIK et NULLET, 1994).

A Hawaii, les îles dont les sommets ne dépassent pas l'altitude moyenne de l'inversion thermique présentent une zone de maximum pluviométrique sommitale marquée par des lames d'eau fortes (*tabl. 5*). C'est le cas à Kauai, où les précipitations moyennes au Mont Waialeale (1 549 mètres) dépassent 11 500 mm.an⁻¹, à Oahu (7 600 mm.an⁻¹ dans la chaîne du Koolau qui culmine à 1 230 mètres), ou encore sur la presqu'île est de Maui (9 000 mm.an⁻¹ au Puu kukui, 1765 mètres ; EKERN *et al.*, 1971 ; PETERSON, 1972 ; GIAMBELLUCA *et al.*, 1986). Ces trois reliefs ne sont pas des barrières efficaces pour les alizés qui peuvent les franchir, le déclenchement des précipitations par effet orographique atteint alors son développement maximal (GIAMBELLUCA et SANDERSON, 1993). La partie sommitale est, de plus, toujours exposée au flux dominant quelle que soit sa direction. A Kauai et à Maui est, de profondes vallées guident le flux d'alizés vers les sommets, ce qui contribue encore à augmenter la pluviométrie dans ces zones.

L'île d'Hawaii (4 206 m) ou Maui ouest (3 057 m) culminent au-dessus de la couche d'inversion thermique (*tabl. 5*). Les masses d'air océaniques ne peuvent franchir le relief, et une grande partie du flux contourne l'obstacle. La zone de pluviométrie maximale est située plus bas, vers 650 mètres d'altitude, tandis que les lames d'eau sont plus faibles que sur Kauai, Oahu ou Maui est (SCHROEDER, 1993).

La présence d'une zone de maximum de pluviométrie sur les versants des îles très hautes est observée dans des contextes climatiques différents. A Fogo (2 829 m), cette zone est située vers 1 000 mètres d'altitude (JUVIK *et al.*, 1995). Sur l'île de Tenerife (3 718 m) aux Canaries, en zone subtropicale, cette zone (1 000 mm.an⁻¹) est localisée entre 500 et 1 500 mètres d'altitude (CUSTODIO *et al.*, 1991).

Aux Antilles, l'existence d'un gradient lié à l'altitude, marquant une forte influence orographique, a été mis en évidence. ROSSIGNOL (1990) mesure que l'accroissement orographique moyen par rapport à un poste littoral est une fonction linéaire de l'altitude sur les flancs de la Soufrière (1 467 mètres) en Guadeloupe, ce que DOUVILLE (1992) ne parvient pas à mettre en évidence sur la façade orientale de la Fournaise, sans doute du fait de l'hétérogénéité géographique du réseau de mesures. L'altitude du sommet de la Soufrière est comparable à celles de Oahu, de Kauai ou de Maui est ; la zone de maximum pluviométrique est également observée au sommet. ROBIN et ROSSIGNOL (1988) enregistrent des précipitations variant de 2000 mm.an⁻¹ en bas de pente à près de

Tableau 5 Synthèse des informations hydrologiques pour différentes îles hautes tropicales et subtropicales. L'altitude de la zone de maximum pluviométrique et les lames d'eau associées dépendent pour une grande part de l'altitude de l'île et de la position de la couche d'inversion thermique. De façon schématique, la zone de maximum pluviométrique est située plus haut et se trouve caractérisée par des lames d'eau plus fortes pour les îles dont l'altitude est inférieure ou proche de celle de la couche d'inversion thermique.

Table 5 Synthetic hydrologic informations on various subtropical and tropical high islands. The maximum rainfall zone altitude and associated water totals mainly depend on the island altitude and on the thermal inversion layer level. In outline, the maximum rainfall zone is shifted upward, and water totals are higher in islands where altitude is lower or equal to the thermal inversion layer elevation.

	Coordonnées géographiques	Pluviométrie moyenne annuelle sur le versant « au vent » (mm)		Altitude de la zone de maximum pluviométrique et valeur	Distance de la cote 0 à la zone de maximum pluviométrique	Gradient pluviométrique horizontal moyen entre la cote 0 et la zone de maximum
		A la cote 0	Au sommet			
La Réunion (La Fournaise, 2 632 m)	21°15'S 55°45'E	4 000	7 000	environ 1 600 m : > 12 000 mm	5,75 km	1 400 mm.km ⁻¹
Tenerife (Teide, 3 718 m)	28°19'N 16°34'W	-	-	entre 500 et 1 500 m : 1 000 mm	-	-
Gran Canaria (1 950 m)	28°00'N 15°36'W	200	900	sommet : 900 mm	15 km	< 50 mm.km ⁻¹
Fogo (Pico, 2 829 m)	14°55'N 24°25'W	< 500	< 700	1 000 m : 1 540 mm	3 km	350 mm.km ⁻¹
Hawaii (Mauna Kea, 4 206 m)	20°N 155°30'W	< 4000	< 500	650 m : > 6 000 mm	4 km	> 500 mm.km ⁻¹
Kauai (Mt. Waialeale, 1 549 m)	22°N 159°30'W	< 1 500	11 500	sommet : 11 500 mm	17 km	850 mm.km ⁻¹
Maui (ouest) (Haleakala 3 057 m)	21°N	3 000	< 1250	650 m : 7 000 mm	6 km	660 mm.km ⁻¹
Maui (est) (Puukukui, 1 765 m)	156°W	< 750	9 000	sommet : 9 000 mm	6 km	1 400 mm.km ⁻¹
Oahu (Koolau Range, 1 230 m)	21°36'N 158°W	1 500	7 600	sommet : 7 600 mm	5 km	1 200 mm.km ⁻¹
Guadeloupe (La Soufrière, 1 467 m)	16°N 61°W	2 000	11 000	sommet : 11 000 mm	12 km	750 mm.km ⁻¹
Rarotonga (650 m)	21°14'S 159°46'W	< 2 000	4 000	sommet : 4 000 mm	2 km	1 000 mm.km ⁻¹
Maurice (825 m)	20°S 57°30'E	1 800	3 600	sommet : 3 600 mm	10 km	180 mm.km ⁻¹

11 000 mm.an⁻¹ au sommet distant de 12 km seulement, soit un gradient d'environ 750 mm.km⁻¹. Sur les îles encore plus basses, la pluviométrie croît jusqu'au sommet, à l'exemple de Rarotonga dans les îles Cook (Océan Pacifique) dont la zone sommitale située à 650 mètres reçoit 4 000 mm.an⁻¹, soit un gradient pluviométrique de 1 000 mm.km⁻¹ (WATERHOUSE et PETTY, 1986).

La comparaison des lames d'eau affectant les îles voisines de Maurice et de la Réunion, soumises à des conditions météorologiques semblables, établit une nette différence de pluviométrie liée au relief. Sur Maurice, les pentes « au vent » sont douces et les sommets peu élevés, les masses d'air océaniques franchis-

sent le relief en conservant une grande partie de leur humidité. Les précipitations sont en augmentation progressive depuis le niveau de la mer avec 1 800 mm.an⁻¹, jusqu'à 3 600 mm.an⁻¹ sur les plateaux d'altitude situés entre 550 et 700 mètres (ROGBEER, 1984). A la Réunion, l'effet de barrière induit par la présence de sommets montagneux proches de la côte contribue à augmenter les lames d'eau dès le niveau de la mer où elles dépassent déjà les valeurs des sommets mauriciens. L'accumulation des masses nuageuses sur la côte « au vent » a pour conséquence la réduction des précipitations sur la côte « sous le vent » : seulement 585 mm.an⁻¹ à la Réunion, alors que près de 800 mm.an⁻¹ sont enregistrés sur la côte ouest de Maurice. Cette valeur de 585 mm.an⁻¹ est très inférieure à la pluviométrie estimée sur les zones océaniques proches à 1 200 mm.an⁻¹ (Unesco, 1977 in CUSTODIO *et al.*, 1991, p. 17).

Le gradient pluviométrique sur les flancs de la Fournaise atteint de fortes valeurs du fait de la pente moyenne du massif : 27 % vers l'est (de 0 à 2 632 mètres en 10,2 km). On peut ainsi estimer, sur la base d'un maximum de 12 000 mm.an⁻¹ à 1600 mètres d'altitude et d'une lame d'eau d'environ 4 000 mm.an⁻¹ au niveau de la mer (*tabl. 3* : poste du Tremblet, 120 mètres d'altitude, 4 337 mm.an⁻¹), qu'une variation d'altitude de 100 mètres entraîne une augmentation de 500 mm de pluie. Ce gradient vertical correspond à un gradient horizontal d'environ 1 400 mm.km⁻¹ dans la zone de plus forte pente : 29 % (de 0 à 1 600 mètres en 5,75 km au Tremblet).

3.5 Synthèse des informations

La présence d'une zone de maximum de pluviométrie située en contrebas du sommet pour les îles hautes tropicales et subtropicales est directement liée à la présence de la couche d'inversion thermique, et à l'altitude moyenne de cette dernière par rapport à celle du relief. A la Réunion, la présence de cette limite thermique fréquemment située entre 2 000 et 2 500 mètres d'altitude est en accord avec le modèle hawaïen. Sur cet archipel, la répartition géographique des précipitations et les lames d'eau associées sont différentes entre les îles que l'on peut qualifier de très hautes, dont les sommets dépassent l'altitude moyenne de la couche d'inversion thermique, et les îles plus basses. Les plateaux d'altitude du massif du Piton de la Fournaise situés vers 2 300 mètres traversent souvent la couche marine humide, l'île se trouve alors dans la situation d'une île très haute telle que Hawaii, Tenerife, Maui ouest ou Fogo. Cette situation génère des précipitations à faible altitude sur les versants. Les très fortes pentes et les profonds encaissements sur la face « au vent » du Volcan contribuent cependant à contraindre une part importante du flux d'alizés à une ascension forcée le long du relief, comme à Kauai et à Maui est. Ce dernier phénomène modère l'influence de l'inversion thermique, et augmente l'altitude de la zone de maximum pluviométrique et les lames d'eau associées.

Dans les situations atmosphériques, fréquentes en saison chaude, où la couche d'inversion thermique est située à plus de 2 300 mètres ou absente, le massif du Piton de la Fournaise ne constitue plus une barrière infranchissable pour les alizés. Des débordements nuageux se produisent au-dessus du relief et le massif se trouve dans un environnement climatique proche de Oahu, de Kauai ou de Maui est, avec des pluies maximales au sommet des pentes « au vent ». Cette situation atteint son paroxysme lors du passage de tempêtes ou de cyclones tropicaux à proximité de l'île, lorsque le développement vertical des nuages peut dépasser dix kilomètres.

3.6 Proposition d'une carte des isohyètes moyennes inter-annuelles

Les séries pluviométriques utilisées pour formuler les nouvelles hypothèses relatives à l'hydrologie du massif ne représentent que deux années de mesures, largement insuffisantes pour des interprétations statistiques. Néanmoins, les références bibliographiques concernant la pluviométrie sur les îles hautes en domaine tropical et subtropical font toujours état d'un gradient pluviométrique lié à l'accroissement d'altitude et à la pente sur les reliefs exposés aux vents dominants, parfois d'un maximum lié à l'altitude dépendant des conditions locales et des types de pluies. Selon OKI *et al.* (1991), il est maintenant évident que pour des stations d'observation alignées sur un versant les quantités d'eau précipitée sont liées à l'altitude. OKI *et al.* définissent par ailleurs quatre paramètres permettant d'expliquer les quantités précipitées : la vitesse d'ascension de l'air, l'apport de vapeur d'eau, la direction et la vitesse du vent.

Le pluviographe des Hauts de Sainte-Rose, avec ses 10 000 mm de précipitation moyenne inter-annuelle calculée sur 19 années, confirme localement la présence d'une zone de maximum pluviométrique située à mi-pente. La généralisation des hypothèses de gradient et de maxima pluviométriques à l'ensemble des planèzes exposées aux flux dominants était conditionnée par l'attente de données nouvelles sur les flancs est ou sud du massif. Les premiers enregistrements des pluviographes de l'alignement du Baril et de Bois Blanc mettent en évidence une pluviométrie comparable à altitude égale entre les postes situés au NE (Hauts de Sainte-Rose, Piton Nelson) et au SE du massif (Baril 900). L'isohyète moyenne inter-annuelle 10 000 mm, qui passe près du pluviographe des Hauts de Sainte-Rose (860 m), peut donc être prolongée vers le sud jusqu'à la région du Baril en suivant la courbe de niveau 900 mètres. La présence d'un gradient pluviométrique croissant avec l'altitude est observée au Baril et à Bois Blanc. Sur la façade orientale du massif, la zone de pluviométrie supérieure à 10 000 mm débute donc vers 900 mètres d'altitude mais n'atteint pas le sommet. Au nord et au sud de l'Enclos, l'isohyète 10 000 mm se referme au niveau des remparts de Basse-Vallée et de la Rivière de l'Est.

Observées sur de courtes durées de fonctionnement simultané, les lames d'eau précipitées aux pluviographes Baril 1600, Bois Blanc 1400 et Flanc Est 1940 sont toujours très supérieures à celles enregistrées dans les Hauts de Sainte-Rose. En première approche, dans l'attente de chroniques de données plus longues, il est possible de généraliser l'hypothèse d'une pluviométrie moyenne supérieure à 12 000 mm.an⁻¹ à l'ensemble des versants orientaux du massif du Piton de la Fournaise d'altitude comprise entre 1 300 et 1 800 mètres (fig. 13). Les fortes lames d'eau enregistrées par le pluviographe Flanc Est 1940 situé dans l'Enclos, en amont des Grandes Pentes, repoussent la limite supérieure de l'isohyète 12 000 mm très en amont, sans doute vers 2 000 mètres d'altitude. L'Enclos, ouvert aux vents dominants, présentant des fortes pentes depuis la mer jusqu'à 2 000 mètres d'altitude, et bordé de falaises qui canalisent le flux d'alizés vers l'amont, se trouve dans une position privilégiée pour le déclenchement des précipitations orographiques. L'isohyète moyenne annuelle 12 000 mm y est sans doute largement dépassée, entre 1 500 et 1 700 mètres d'altitude, où des lames d'eau supérieures à 15 000 mm.an⁻¹ sont pressenties.

Sur les planèzes allant du sud au nord-est, la pluviométrie suit globalement les courbes de niveaux. Sur le littoral, les lames d'eau sont de 4 000 mm.an⁻¹. La zone de maximum pluviométrique est définie par l'isohyète 12 000 mm qui

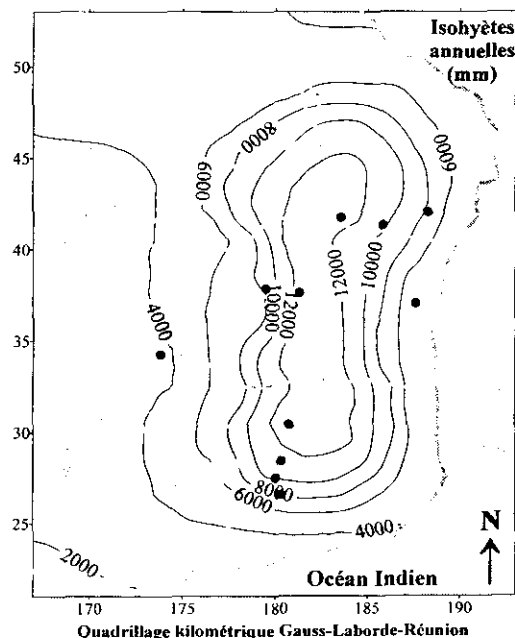


Figure 13 Carte des isohyètes moyennes annuelles estimées à partir des informations des nouveaux postes pluviométriques. Par commodité de lecture, seules les isohyètes 2, 4, 6, 8, 10 et 12 mètres ont été représentées.

Mean annual isohyet map drawn from the new rain gauge data. For easy reading, only 2, 4, 6, 8, 10 and 12 metre isohyets are drawn.

englobe les zones situées à mi-pente des versants orientaux entre 1 300 et 1 800 mètres, jusqu'à environ 2 000 mètres dans l'Enclos. La décroissance est rapide sur les flancs sud et nord du massif lorsqu'on se dirige vers l'ouest puisque les versants ne sont plus orientés face aux flux dominants qui sont le plus souvent de secteur sud-est à nord-est. Au-dessus de la zone de maximum, la pluviométrie décroît tandis que l'altitude augmente ; elle représente tout de même environ $7\,000\text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ au sommet du Volcan à 2 632 mètres.

4 – CONCLUSION

Les données pluviométriques récentes enregistrées sur les planèzes du massif du Piton de la Fournaise à la Réunion, dans des zones d'altitude difficiles d'accès, contribuent à modifier les modèles d'alimentation hydrique admis jusqu'à présent. Les cartes des isohyètes sous-estimaient jusqu'alors fortement les lames d'eau sur le flanc sud du massif et dans l'Enclos, et plaçaient la zone du maximum pluviométrique plus bas qu'elle n'est observée aujourd'hui.

Les données pluviométriques enregistrées sur le massif du Piton de la Fournaise font donc apparaître une zone de très forte pluviométrie entre 1400 et 1940 mètres d'altitude sur le versant « au vent ». Pour expliquer cette localisation, il faut faire appel aux schémas relatifs aux îles hautes et très hautes, développés sur l'archipel d'Hawaïi. Les précipitations dans le cas des îles hautes (Oahu, Kauai, Maui est, la Guadeloupe), dont l'altitude ne dépasse pas la position moyenne de la couche d'inversion thermique, sont très fortes dans la zone sommitale. Pour les îles très hautes (Hawaïi, Maui ouest, Tenerife, Fogo) les sommets traversent très fréquemment la couche d'inversion thermique ; les précipitations maximales sont plus modérées et situées à une altitude nettement inférieure sur les versants « au vent ». La Fournaise se situe alternativement dans l'une ou l'autre de ces situations selon la position de la zone d'inversion thermique. L'absence fréquente d'inversion thermique en saison chaude et le passage de dépressions tropicales provoquent des pluies très fortes près des sommets. L'inversion thermique très marquée et basse en hiver austral limite les pluies aux zones de faible altitude. La présence de grands encaissements et de fortes pentes depuis le sommet jusqu'à la mer accentuent les effets du relief et contribuent à définir un environnement climatique et hydrologique original. La zone de maximum pluviométrique a une large extension en altitude, au sommet des Grandes Pentés ; les lames d'eau enregistrées et les gradients pluviométriques sont particulièrement élevés, parmi les plus forts connus.

Une nouvelle carte des isohyètes moyennes inter-annuelles est proposée pour l'ensemble du massif. Une zone de maximum pluviométrique définie par l'isohyète 12 000 mm est localisée entre 1 300 et 1 800 mètres d'altitude, localement jusqu'à 2 000 mètres dans l'Enclos, sur toute la façade orientale du massif depuis le nord jusqu'au sud. La pluviométrie décroît depuis cette zone jusqu'au niveau de la mer où elle atteint environ 4 000 mm.an⁻¹. Les courbes d'isohyètes sont parallèles aux courbes de niveau et montrent une diminution moyenne de la pluviométrie d'environ 500 mm pour 100 mètres d'altitude. Le gradient pluviométrique linéaire atteint ainsi 1 400 mm.km⁻¹ dans la zone de plus grande pente. Au-dessus de la zone de maximum, la pluviométrie décroît également : elle atteint environ 7 000 mm.an⁻¹ au sommet du Volcan situé à 2 632 mètres d'altitude. Aux extrémités ouest de la zone de maximum pluviométrique, la décroissance est rapide et les isohyètes recoupent les courbes de niveau à Basse-Vallée au sud et vers la Rivière de l'Est au nord, le changement d'exposition des versants par rapport aux flux d'alizés et la présence de grands remparts étant les raisons principales de la diminution des lames d'eau.

REMERCIEMENTS

Cette recherche est soutenue par le programme « Hydrogéologie du massif du Piton de la Fournaise » financé par le Conseil Général de la Réunion. Les auteurs remercient Météo France, le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère de l'Université de la Réunion, la Maison du Volcan (M. DUPONT) et le CIRAD (M. COMBRES) pour les données fournies ; le BRGM (Thierry KAUFMANT) pour les cartes en courbes de niveau ; Fabienne Taupin pour son aide précieuse ; Xavier Cruciani et Olivier Police pour leurs indispensables contributions lors de l'installation du réseau de mesures.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANONYME, 1975. Atlas des Départements d'Outre-Mer. I. La Réunion. *Centre d'études de Géographie tropicale du CNRS, Paris*, ISBN 2-222-01911-7.
- ANONYME, 1994. Bulletin climatologique mensuel, mai 1994. *Météo France, Direction Régionale de la Réunion*, ISSN 0181 4710, 19 p.
- ANONYME, 1995. Saison cyclonique 1994-1995. *Météo France, Direction Régionale de la Réunion*, 95 p.
- BARGEAS A., ROCHE P.A., THIERY D., 1984. Analyse régionale des apports mensuels de très forte variabilité dans le temps et dans l'espace : exemple de l'île de la Réunion. *Société Hydrotechnique de France, Groupe Pluviométrie*, 1-10.
- BEAN C., JUVIK J.O., NULLET D., 1994. Mountain evaporation profiles on the island of Hawaii. *J. Hydrol.*, 156, 181-192.
- CUSTODIO E., JIMENEZ J., ANTONIO J., NUNEZ J., PUGA L., BRAOJOS J., 1991. Hydrology and water resources of small islands : a practical guide. *Studies and reports in hydrology*, 49, UNESCO, 339-355.
- DOUVILLE H., 1992. Utilisation d'un modèle numérique de terrain pour le calcul de champs pluviométriques en zone montagneuse. Application de la méthode à l'île de la Réunion. Service météorologique régional de la Réunion. 155 p.
- EKERN P.C., LAU L.S., PETERSON F.L., PRICE S., PULFREY R., 1971. Hydrologic systems in Hawaii. *Proc. United States-Japan Bilateral Seminar in Hydrology*. Honolulu, Hawaii : 186-201.
- GIAMBELLUCA T.W., NULLET M.A., SCHROEDER T.A., 1986. Rainfall atlas of Hawaii. Report R 76, Hawaii Department of Land and Natural Resources, Division of Water and Land Development, Honolulu.
- GIAMBELLUCA T.W., NULLET D., 1992. Evaporation at high elevations in Hawaii. *J. Hydrol.*, 136, 219-235.
- GIAMBELLUCA T.W., SANDERSON M., 1993. The water balance and climatic classification. *Prevailing trade winds. Climate and weather in Hawaii (Chap. 4)*. Marie Sanderson Editor, University of Hawaii Press, Honolulu, 56-72.
- JUVIK J.O., NULLET D., 1994. A climate transect through tropical montane rain forest in Hawaii. *J. Appl. Meteor.*, vol. 33, n° 11 : 1304-1312.
- JUVIK J.O., DOS ANJOS C., NULLET D., 1995. Direct cloud water recovery by inertial impaction : implications for large scale water supply in the Cape Verde islands. *Theor. Appl. Climatol.*, 51, 89-96.
- MALICK M., MERCUSOT M., 1976. Le fichier des cyclones à la Réunion. *La Météorologie*, VI^e série, 6, 237-262.
- NULLET D., JUVIK J.O., 1994. Generalised mountain evaporation profiles for tropical and subtropical latitudes. *Singapore Journal of Tropical Geography*, vol. 15, n° 1, 17-24.
- NULLET D., JUVIK J.O., WALL A., 1995. A hawaiian mountain climate cross-section. *Clim. Res.*, 5, 131-137.
- OKI T., MUSIAKE K., KOIKE T., 1991. Spatial rainfall event in mountainous regions, estimated by orography and wind direction. *Water Resources Research*, vol. 27, n° 3, 359-369.
- PETERSON F.L., 1972. Water development on tropic volcanic islands - Type example : Hawaii. *Ground Water*, vol. 10, n° 5, 18-23.
- ROBERT R., 1986. Climat et hydrologie à la Réunion : Etude typologique et régionale des pluies et de l'écoulement. *Thèse, Univ. de Montpellier*. 438 p.
- ROBIN P., ROSSIGNOL D., 1988. Modélisation thermodynamique des pluies orographiques en Guadeloupe. *ORSTOM, note interne*, 10 p.
- ROGBEER G., 1984. Mauritius water resources. *Proc. Regional Workshop on Water Resources of small islands*, Suva, Fiji. *Commonwealth Science Concil Tech. Publ. Series*, n° 182, Part 3, 114-119.
- ROSSIGNOL D., 1990. Influence du relief sur les précipitations en Guadeloupe. *ORSTOM, note interne*, 13 p.
- SCHROEDER T., 1993. Climate controls. *Prevailing trade winds. Climate and weather*

- in Hawaii (Chap. 2). Marie Sanderson Editor, University of Hawaii Press, Honolulu, 12-36.*
- TOUCHEBOEUF DE LUSIGNY P., LE GOURRIÈRES D., 1964. Hydrogéologie souterraine de la Réunion. Exposés des résultats obtenus par la mission ORSTOM 1959-1961, *ORSTOM, note interne*, 15 p.
- WATERHOUSE B.C., PETTY D.R., 1986. Hydrogeology of the southern Cook Islands, south Pacific. *New Zealand Geol. Survey Bull.* 98. Department of Scientific and Industrial Research, 93 pp.